

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ДУДНІК АНДРІЙ СЕРГІЙОВИЧ

УДК 531.7.08:004.7

**НАУКОВІ ОСНОВИ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СЕНСОРНИХ СИСТЕМ
ВИМІРЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН**

05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий
консультант:

Заслужений метролог України,
доктор технічних наук, професор
КВАСНІКОВ Володимир Павлович,
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри комп'ютеризованих
електротехнічних систем та технологій.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
КОЛОМІЄЦЬ Леонід Володимирович,
Одеська державна академія технічного регулювання та
якості, ректор;

доктор технічних наук, професор
ПОДЧАШИНСЬКИЙ Юрій Олександрович,
Житомирський державний технологічний університет,
завідувач кафедри метрології та інформаційно-
вимірювальної техніки;

доктор технічних наук, професор
КОРСУН Валерій Іванович,
Національний технічний університет "Дніпровська
політехніка", завідувач кафедри метрології та
інформаційно-вимірювальних технологій.

Захист відбудеться "17" травня 2019 р. о 14⁰⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.07 у Національному технічному університеті України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" за адресою 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37, корпус 1, ауд. 317.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" за адресою 03056, м. Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий "___" _____ 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Ю.В. Киричук

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний стан розвитку авіаційної та машинобудівної галузей характеризується швидким розвитком приладів вимірювання механічних величин та інформаційних вимірювальних систем. Це вимагає постійного зростання кількості засобів автоматизації процесу вимірювання.

Пошук нових підходів до розробки методів, методологій та алгоритмів функціонування приладів вимірювання механічних величин обумовлений необхідністю розробки засобів збору та сприйняття інформації, що описують об'єкт вимірювання з більшою точністю та швидкодією.

В даний час проблема визначення позиції об'єкта з високою точністю при вимірюванні відстаней від декількох міліметрів до декількох десятків метрів може бути вирішена за допомогою імпульсного, частотного і фазового методів вимірювання відстані, але їх використання в далекометрії зводиться лише до застосування в прикладах, що діють в зоні прямої видимості.

Традиційні далекомірні системи, полягають у використанні імпульсного або безперервного електромагнітного випромінювання мають високу точність визначення відстані. У зв'язку з великою швидкістю поширення електромагнітних хвиль застосування цього методу доцільно використовувати для вимірювання великих відстаней. Тому у таких випадках більше підходять комп'ютеризовані сенсорні приладові системи вимірювання механічних величин (КСПСВМВ), що є важливим інструментом дослідження. Їх важливість пов'язана з новими можливостями використання, що обумовлені такими характеристиками безпроводних сенсорів, як відсутність необхідності у кабельній інфраструктурі, мініатюрність вузлів, низьке споживання електроенергії, вбудований радіоінтерфейс, досить висока обчислювальна здатність, порівняно невелика вартість.

Дослідження в області розвитку методів і комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин проводяться в багатьох наукових центрах України – в Національному технічному університеті України "КПІ ім. І. Сікорського", Київського національного університету ім. Т. Шевченка, Національному авіаційному університеті, Національному університеті «Львівська політехніка», Національному аерокосмічному університеті ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» та ін.

Вагомий вклад у розробку комп'ютеризованих приладових систем вимірювання механічних величин представлений у наукових роботах вітчизняних та зарубіжних вчених: О.М. Безвесільної, В.П. Маслова, Ю.П. Зайченка, М.А. Виноградова, Ю.В. Кравченка, а також Геєра Д., Ірвіна Дж., Лієрі Дж., Рошана П., Столлінгса В., Харля Д. та ін.

Оскільки відомі методи та системи вимірювання механічних величин не забезпечують високу точність та швидкодію вимірювання та відсутні науково-теоретичні та практичні роботи, які присвячені дослідженням комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання лінійно-кутових величин, тому постає задача у необхідності вдосконалення сенсорних приладових систем вимірювання механічних величин, розробки нових швидкодіючих прецизійних

засобів вимірювання і контролю механічних величин та удосконаленні існуючих методів і засобів вимірювання з покращеними метрологічними характеристиками.

Одною з таких задач є вимірювання механічних величин, а саме лінійно-кутових розмірів, переміщень, деформації та швидкості з метою локалізації вузлів у комп'ютеризованій сенсорній приладовій системі з самоорганізацією, що включає вимірювання відстані між вузлами, часу поширення сигналу між ними, та кута між сусідніми вузлами.

Актуальність даної роботи полягає у необхідності подальшого розвитку теорії та принципів побудови комп'ютеризованих приладових систем вимірювання механічних величин, здатних забезпечити високу точність вимірювання та достатню швидкість при дії на приладову систему шумів і завад різного роду.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до наукового напрямку кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій, відповідно до Закону України № 3715-VI "Про пріоритетні напрямки інноваційної діяльності в Україні", зокрема, "Освоєння нових технологій високотехнологічного розвитку транспортної системи, ракетно-космічної галузі, авіа- і суднобудування, озброєння та військової техніки", а також пов'язана з держбюджетною тематикою Міністерства освіти і науки України в науково-дослідній роботі № 125-ДБ17 "Методологія побудови сучасних дистанційних інформаційно-вимірювальних систем" (номер держреєстрації 0117U002367), де автор був виконавцем (розділ 2.3).

Мета та задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є вирішення важливої науково-технічної проблеми створення наукових основ розробки комп'ютеризованої сенсорної приладової системи вимірювання механічних величин за рахунок винаходу нових та удосконалення існуючих методів і засобів вимірювання з покращеними метрологічними характеристиками та алгоритмічною обробкою даних про параметри розташування об'єктів.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі:

1. Провести аналіз існуючих методів і засобів вимірювання відстані, часу проходження сигналу і кута між об'єктами та систематизувати відомі теоретичні підходи, що покладено в основу їх побудови.
2. Сформулювати теоретичні основи методів вимірювання відстані, часу проходження сигналу і кута та проаналізувати способи підвищення їх точності.
3. Вивести рівняння похибок приладової системи, проаналізувати складові похибки первинних мікропроцесорних перетворювачів. Розробити модель похибок КССВМВ при визначенні відстані, часу проходження сигналу і кута між об'єктами.
4. Розробити високоточні мікропроцесорні первинні перетворювачі, алгоритми та засоби обробки сигналів сенсорних приладових систем.
5. Розробити метод підвищення продуктивності комп'ютеризованих приладових сенсорних вимірювальних систем, з метою підвищення точності

при передачі даних вимірювання, що можуть викликати недостовірну оцінку похибки в сенсорних приладах.

6. Розробити безпроводний сенсорний прилад вимірювання відстані між об'єктами з функцією підвищення якості передавання показників вимірювання в зонах невпевненого прийому, на базі фільтру Гауса.

7. Розробити комп'ютеризований лазерний віддалемір з сенсорним мережевим інтерфейсом, що поєднує у собі функції лазерного далекоміра, та методи визначення відстані між об'єктами безпроводних сенсорних приладів, що дасть змогу оцінювати відстань на основі двох показників, з метою зменшення похибки, а також, враховуючи використання методу *Angle of Arrival* для визначення кута, буде виконувати функції електронного тахеометра.

8. На основі запропонованих математичних моделей для підтвердження їх адекватності, провести експериментальні дослідження розроблених вимірювальних перетворювачів та засобів вимірювання розроблених теоретичних моделей, ефективності запропонованих методів та створених на цій основі комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин.

Об'єктом дослідження є процес вимірювання механічних величин, а саме лінійно-кутових параметрів за допомогою комп'ютеризованої приладової системи.

Предметом дослідження є методи і засоби вимірювання відстані, лінійно-кутових розмірів між об'єктами, переміщення та деформації з покращеними метрологічними характеристиками та алгоритмічною обробкою даних.

Методи досліджень. Для досягнення поставленої мети в роботі використовуються такі методи досліджень:

- методи локалізації об'єктів (вимірювання відстані на основі падіння потужності, методи вимірювання відстані на основі часу отримання сигналу *ToA – Time of Arrival* та *Time Difference of Arrival*, а також метод *Angle of Arrival* для визначення кута отриманого сигналу первинним перетворювачем), методи оцінки параметрів сигналу первинних перетворювачів для вимірювання лінійно-кутових розмірів між об'єктами, переміщення та деформації;

- методи теорії масового обслуговування, теорії похибок, методи математичного моделювання, методи аналізу випадкових похибок первинних перетворювачів для дослідження розроблених моделей та методів вимірювання механічних величин, а також методи ідентифікації зон невпевненого прийому в каналах засобу вимірювання, метод фільтрації сигналів, за допомогою фільтру Гауса для покращення метрологічних характеристик БСПС;

- методи теорії метрології, вимірювання потужності передачі сенсорних вимірювальних приладів та її відхилення від номінального значення, методи вимірювання амплітуди та фази сигналу, а також аналізу їх похибок для отримання відповідних параметрів сигналу первинними перетворювачами, з метою їх перетворення у лінійно-кутові розміри до об'єкту;

- методи вимірювання відстані, часу отримання сигналу та кута між об'єктами, методи фізичного та математичного моделювання з широким використанням пакетів прикладних програм та інженерно-обчислювальних

комплексів *MATLAB*, *Motorola LAN planer* та *Electronics Workbench* з метою створення віртуальних приладів для перевірки теоретичних рішень.

Наукова новизна отриманих результатів. Найбільш суттєві результати отримані автором особисто і визначаються такими положеннями:

- вперше сформульовані нові принципи побудови приладових систем із включенням безпроводних сенсорних пристроїв для вимірювання механічних величин, що базуються на отриманні альтернативних показників вимірювання, завдяки функції локалізації сенсорів у складі комп'ютеризованої приладової системи;

- вперше розроблені нові підходи для вирішення проблеми визначення принципу дії мікропроцесорних первинних вимірювальних перетворювачів, що включені до складу безпроводних сенсорних пристроїв, для створення комп'ютеризованих приладових систем на їх основі та складені рівняння оцінки їх похибок;

- вдосконалено модель визначення відстані на основі часу отримання сигналу, що дає змогу оцінювати відстань по передньому фронту імпульсу та оцінити похибку з врахуванням перешкод;

- вдосконалено комп'ютеризований лазерний далекомір, до складу якого включено безпроводний сенсорний інтерфейс, що дає змогу оцінювати відстань на основі двох альтернативних показників;

- вперше розроблено метод підвищення продуктивності комп'ютеризованих сенсорних вимірювальних систем, з метою підвищення точності при передачі даних вимірювання, що можуть викликати недостовірну оцінку похибки в сенсорних приладах;

- дістала подальший розвиток методика локалізації безпроводних сенсорів, що дає змогу оцінити відстань між сенсорами, час проходження сигналу між ними, та кут, що в поєднанні з лазерними далекомірами утворює тахеометричну сенсорну приладову систему;

- дістала подальший розвиток методика визначення відстані між об'єктами в умовах відсутності прямої видимості, що відрізняється від існуючих методів далекометрії тим, що світловий промінь, який в них застосовується, не здатний розповсюджуватись по криволінійним траєкторіям.

Практичне значення отриманих результатів полягає у тому що:

- розроблено математичну модель для дослідження процесу вимірювання відстані в безпроводних сенсорних мережах у поєднанні з блоками лазерного віддалеміра. Вхідними параметрами з боку сенсорної БСПС є потужності відправленого та прийнятого сигналу, а з боку лазерного віддалеміра – швидкість світла у вакуумі, показник переломлення середовища та час проходження променя до цілі і назад. Вихідними параметрами, в обох випадках, є відстань між об'єктами, що отримана двома різними методами. Це дало змогу отримати результати досліджень з достатньою точністю, шляхом співставлення вихідних параметрів, а саме похибка $\delta \approx 0,2\%$, що є допустимим для ділянки (250x250) м;

- модернізовано структурну схему сенсорного безпроводного пристрою, шляхом включення в її склад блоків лазерного віддалеміра. Що дає можливість

отримати альтернативне значення відстані між об'єктами. Це дало змогу, при сталих перешкодах, знизити похибку вимірювання у 2,5 рази, використовуючи для співставлення дані сенсорної БСПС та лазерного віддалеміра;

- розроблено математичну модель визначання відстані між сенсорними прийомопередавачами, на основі часу отримання сигналу, а також проведено оцінку похибки визначення часу отримання сигналу по передньому фронту імпульсу, а також визначено основні параметри, що на неї впливають;

- розроблено метод підвищення продуктивності комп'ютеризованих сенсорних вимірювальних систем, що у порівнянні з існуючими дозволяє збільшити дальність вимірювань до (15 – 17) м, при цьому показники похибки збігаються в межах $\delta \approx 0,2\%$, при загальній дальності 160 м;

- розроблено маршрутний сенсорний прилад, що здатний перерозподіляти вимірювальні сигнали, з метою уникнення помилок при обробці даних вимірювання механічних величин в комп'ютеризованій сенсорній приладовій системі;

- модернізовано сенсорний вимірювальний пристрій, до складу якого входить мікропроцесорний первинний перетворювач, що дозволяє аналізувати похибку вимірювань механічних величин.

Наукову новизну та практичне значення результатів роботи підтверджено двома патентами України №60400 та №69626.

Впровадження результатів роботи. Теоретичні і практичні здобутки роботи впроваджено на підприємстві ПАТ «НВО «Київський завод автоматики» (акт впровадження від 14.06.2018 р.) та у навчальний процес в Національному авіаційному університеті при викладанні дисциплін “Фізичні основи сучасної метрології” і “Інформаційно-вимірювальні системи” (акт впровадження від 04.09.2018 р.).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові положення та результати, що виносяться на захист, отримані автором самостійно. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в роботі використані ті результати, що є результатом особистої праці здобувача. Достовірність та обґрунтованість результатів дисертаційної роботи підтверджено збіжністю аналітичних розрахунків, експериментально та моделюванням на ПК.

Особистий внесок здобувача у праці, опубліковані у співавторстві, зі списку публікацій за темою дисертації: [1] – описані моделі вимірювальних приладів та їх експериментальні дослідження; [2-4, 44] – запропонований метод підвищення завадостійкості безпроводних сенсорних приладів вимірювання механічних величин; [7, 48] – запропонована модель прогнозування похибки в комп'ютеризованих вимірювальних приладових системах; [8, 11, 12, 19, 45] – розроблені схеми та моделі безпроводних сенсорних пристроїв, як засобів вимірювання лінійних розмірів; [15] – розроблений алгоритм вимірювання механічних величин, що дозволяє знизити імовірність похибок при їх аналізі; [16] – запропонована модель оцінки похибки вимірювання відстані з урахуванням перешкод; [21] – запропонована методика оцінки впливу температури на похибку вимірювання відстані; [22, 24, 25, 49] – запропоновані методи вимірювання та принцип дії системи визначення лінійних відстаней;

[26] – розроблена методика застосування безпроводної сенсорної приладової системи вимірювання механічних величин спеціального призначення; [27, 30, 43] – запропоновано модель приладової системи вимірювання механічних величин в технології "Інтернет речей"; [31, 39] – запропонована модель збору, обробки та аналізу результатів вимірювання механічних величин приладової системи; [40, 41] – розроблено блок моніторингу стану якості сигналу для застосування у безпроводному сенсорному вимірювальному пристрої та алгоритм перерозподілу у вузловому безпроводному сенсорному вимірювальному пристрої; [52] – розроблено модель взаємодії сенсорних приладів в комп'ютеризованій приладовій системі вимірювання механічних величин; [57] – розроблено принципи дії сенсорного мережевого приладу вимірювання механічних величин.

Апробація результатів дисертації. Викладені у дисертаційній роботі результати досліджень доповідалися, обговорювалися та одержали схвалення на таких наукових конференціях і семінарах: 3^я міжнародна НПК "Управління, автоматизація та навколишнє середовище" (м. Севастополь 2012 р.); 5^а міжнародна НПК "Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії" (м. Переяслав-Хмельницький 2014 р.); міжнародна НПК "Метрологія і інформаційно-вимірювальна техніка" (м. Київ 2017 р.); міжнародна НПК 17^а "Машинобудування очима молодих: Прогресивні ідеї – наука – Виробництво" (м. Чернігів 2017 р.); НПК "Актуальні проблеми інформаційних технологій" (м. Київ 2017 р.); НПК "Удосконалення та модернізація озброєння, військової та спеціальної техніки, що знаходиться на озброєнні Збройних Сил України, шляхом впровадження технічних рішень, що охороняються патентами України на винахід та корисну модель" (м. Київ 2017 р.); 8^а міжнародна НПК "Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації" (м. Кам'янець-Подільський 2018 р.); 10^а, 11^а міжнародна НПК «Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси» (м. Київ 2017 р., 2018 р.); 31^а, 32^а міжнародна НПК "Актуальні проблеми сучасної науки" (м. Москва–Астана–Харків–Відень, м. Санкт-Петербург–Астана–Київ–Відень 2018 р.); міжнародна НПК "Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання" (м. Івано-Франківськ 2018р.); 8^а міжнародна НПК «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем» (м. Чернівці 2018 р.); 9^а Всеукраїнська НПК "Технічне регулювання, метрологія та якість: виклики сучасності" (м. Одеса 2018 р.); 3^я міжнародна НПК "Інноваційний розвиток науки нового тисячоліття" (м. Чернівці 2018 р.); 3^я міжнародна НПК "Теорія і практика сучасної науки" (м. Київ 2018 р.) 3^я міжнародна НПК "Сучасні тенденції розвитку науки" (м. Львів 2018 р.); 11^а міжнародна НПК "Метрологія та вимірювальна техніка" (м. Харків 2018 р.). Також результати дисертаційної роботи доповідались на наукових семінарах кафедри комп'ютеризованих електротехнічних систем і технологій Національного авіаційного університету.

Публікації. За результатами досліджень опубліковано 60 наукових праць, у тому числі 2 монографії, 25 статей у наукових фахових виданнях (з них 9 статей у виданнях іноземних держав, 9 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 2 патенти України на корисну модель, 17 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій, 14 статей у інших виданнях.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано її мету та наукову проблему, наведено основні наукові та практичні результати, показано зв'язок вибраного напрямку з науковими програмами, планами та темами, наведено дані про особистий внесок здобувача, публікації, апробацію та впровадження результатів досліджень.

У першому розділі проведено загальний аналіз приладів вимірювання механічних величин для визначення лінійних та кутових розмірів, їх позиції відносно об'єкта, а також проведено аналіз існуючих комп'ютеризованих приладових систем, що мають в своєму складі безпроводні сенсорні прилади.

Показано, що в приладах вимірювання механічних величин прийнято застосовувати наступні методи:

Імпульсний метод (ІМ). Для реалізації якого незатухаючі коливання несучої частоти піддаються в передавальній пристрій амплітудноімпульсної модуляції. Виявлено, що перевага даного методу є і в тому, що при порівняно простій апаратурі, дозволяє одночасно вимірювати дальність багатьох об'єктів. До недоліків методу відносяться неможливість вимірювання малих відстаней. Даний метод не забезпечує вимірювання радіальної швидкості цілі.

Обґрунтовано, що при частотному методі визначення відстані до об'єкта при використанні частотної модуляції (ЧМ) базується на вимірюванні збільшення частоти передавального пристрою на протязі сумарного часу поширення сигналу до об'єкта та в зворотному напрямку. Значення частоти передавального пристрою має змогу змінюватися за лінійним законом. В результаті змішування цих коливань утворюються імпульси, спектр яких складається з однієї спектральної лінії.

Показано, що недоліками даного методу вимірювання відстані є складність апаратури при вимірюванні дальності до багатьох об'єктів, ефективної розв'язки приймального і передавального трактів, високі вимоги до лінійності зміни частоти випромінюваних коливань при вимірюванні відстані.

Встановлено, що основною перевагою методу є мала пікова потужність випромінюваного сигналу при високій точності вимірювання дальності і можливість вимірювання дуже малих відстаней (до 10^{-5} м).

Показано, що при фазовому методі застосовуються безперервні сигнали (не обов'язково монохроматичні). Вимірювання часу проходження сигналу проводиться шляхом визначення різниці фаз між модулюючими коливаннями масштабної частоти, які виділяються з випромінюваного і прийнятого сигналів. Різниця фаз між цими коливаннями має зв'язок з часом проходження сигналу.

Встановлено, що основна перевага методу полягає в тому, що при виборі масштабної частоти необхідно забезпечити досить високу точність вимірювань (до 10^{-4} м).

Визначено наступні недоліки даного методу: неможливість одночасного вимірювання дальності кількох об'єктів, що знаходяться в зоні опромінення вимірювача дальності, необхідність придушення випромінюваного сигналу, який надходить на вхід приймаючого пристрою, складність технічної реалізації, яка обумовлена необхідністю використання декількох шкал.

Проаналізовано світлодалекоміри та розглянуто мікропроцесорні первинні перетворювачі лінійно-кутових величин, що в них застосовуються. Розглянуто структуру електронних тахеометрів, їх принцип дії, зовнішню будову, а також структурну схему взаємодії його основних частин.

У другому розділі представлено результати теоретичних досліджень по розробці методики вимірювання механічних величин, що поєднує методи оцінки відстані та кута, обчислення лінійно-кутових розмірів до об'єкта та алгоритми локалізації. Розроблено моделі, методи та рекомендації вимірювання лінійно-кутових величин на основі часу отримання сигналу та падіння його потужності, що містять засоби визначення величини похибок вимірювання, які дають можливість більш точно оцінити показники вимірювання механічних величин.

Встановлено, що для розробки методу оцінки відстані між вузловими приладами в системі локалізації є визначення коефіцієнту, який впливає на продуктивність системи. Для оцінки необхідно знати інформацію про число значень трьох показників відстані. Але з іншої сторони, якби тільки точність таких методів була важлива, можемо використати метод вимірювання відстані TDoA. Розроблено метод TDoA використовується для обчислення координат БСПС, де ультразвуковий імпульс передається одночасно з радіосигналом. В цьому випадку, вузли визначають різницю часу отримання двох сигналів, а відстань буде обчислюватися за формулою:

$$d = (S_r - S_s)(t_2 - t_1),$$

де S_r і S_s – швидкість поширення радіо та ультразвукового сигналу, і t_1 і t_2 – час отримання радіо та ультразвукових сигналів, відповідно.

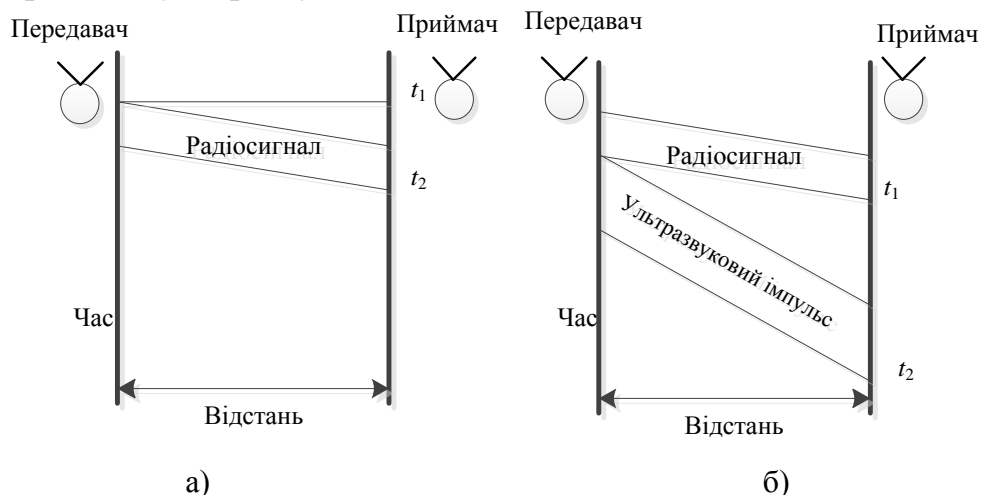


Рисунок 1 – Визначення відстаней за допомогою методів: а) ToA – (Time of Arrival); б) TDoA (Time Difference of Arrival)

При проведенні експериментів з ультразвуковим сигналом вимірювального приладу XBee серії S2 S2C ZigBee визначено похибку $2 \cdot 10^{-3}$ м.

Показано, при похибках $\Delta = (10^{-2} - 10^{-3})$ м лінійних розмірів, у цих методах є певні недоліки, а саме потреба додаткових апаратних засобів щоб надсилати додатковий сигнал, який збільшує вартість вузла, також діапазон цього сигналу, що зазвичай менший – між 3 м і 10 м з більш потужними передавачами.

Запропоновано математичну модель визначення координат в БСПС, що полягає у розміщенні певного числа сенсорів $\{i\}$ на ділянці S площею $S = A \times B$, при умові, що вони розташовані випадковим чином, де $M = [1, \dots, K]$.

Показано, що об'єкти мають радіозасоби, завдяки яким кожен об'єкт має змогу спілкуватися і визначати відстані d до найближчих "сусідів" (об'єкти з якими є зв'язок в радіусі L), при цьому (виходячи із методу визначення відстаней) відома точність вимірів, що проводяться. Кожен об'єкт i збирає інформацію про відстані до усіх доступних "сусідів" j і формує матрицю T_i

$$T_i = \{J, d_{ij}\},$$

де J – кількість сусідніх вузлів, d_{ij} – виміряна відстань від i до j .

На основі даних про кількість сусідніх вузлів та виміряну відстань від i до j , визначаються координати об'єктів \vec{r}_p за допомогою розв'язку системи рівнянь

$$\vec{r}_i - \vec{r}_j = d_{ij},$$

де \vec{r}_i – координата орієнтира i , що завідома відома (наприклад за допомогою вмонтованого GPS модуля), \vec{r}_j – визначена координата сусіднього пристрою j , d_{ij} – виміряна відстань від i до j , як правило містить похибку вимірювання, яка описується розподілом

$$F = (d_{ij}, \delta_{ij}),$$

де $i, j = [1, \dots, K], i \neq j$.

У двовимірному випадку $\vec{r}_i = |x_i y_i|^T$, в тривимірному – відповідно $\vec{r}_i = |x_i y_i z_i|^T$, де x_i, y_i, z_i – координати i -того об'єкта відносно відповідної осі.

Вимірювання відстаней здійснюється на основі вимірювання часу розповсюдження сигналу від передавального пристрою до приймаючого пристрою (Time of Arrival - ToA), або на основі оцінки рівня прийнятого сигналу (ReceivedSignalStrengthIndicator-RSSI). При дослідженні БСПС було встановлено, що алгоритм ToA дає меншу похибку в вимірі відстані, але оскільки приймаючий пристрій стандарту ZigBee підтримують метод RSSI апаратно, то він є більш доцільний в використанні. Вирішення поставленої задачі можна шукати 2-ма способами: перший полягає в зведенні розглянутої нелінійної задачі якимось чином до лінійної, другий – вирішення нелінійної задачі, як у випадку з рівнянням:

$$f = \sum_i f_i = \sum_i \sum_j (|\vec{r}_i - \vec{r}_j| - d_{ij})^2,$$

де \sum_i – сума координат пристроїв орієнтирів i , \sum_j – сума визначених координат пристроїв j , що є сусідніми з орієнтирами, \vec{r}_i – координата орієнтира i , \vec{r}_j – визначена координата сусіднього пристрою j , d_{ij} – виміряна відстань від i до j .

Розроблено метод вимірювання відстані, який окрім алгоритму RSSI, що застосовується для визначення координат залежить і від таких факторів, як

однорідність розподілення об'єктів всередині БСПС, щільність розподілу об'єктів БСПС, точність вимірювання відстані.

Визначено, що для оцінки якості роботи алгоритму і оцінки результатів вимірювання механічних величин доцільно використовувати такі критерії:

1. Процентне співвідношення числа об'єктів, координати яких визначені до загального числа об'єктів залежно від щільності БСПС і точності вимірювання відстані;

2. Середньоквадратичне відхилення оцінок відстаней, отриманих за допомогою алгоритму визначення координат RSSI, на основі відповідних оцінок відстаней;

3. Відхилення оцінок відстаней, отриманих в процесі роботи БСПС від результатів роботи алгоритму визначення координат.

Самий очевидний спосіб вирішення поставленого завдання – це оснащення всіх об'єктів БСПС модулями зовнішньої радіонавігаційної системи (GPS, ГЛОНАСС). Проте стосовно до даної задачі таке рішення має ряд недоліків: вартість модулів, їх розміри, високе енергоспоживання тощо.

Встановлено, що одним з найпоширеніших підходів до вирішення завдання пошуку координат на основі інформації, отриманої в процесі роботи сенсорної системи, є підсистема APS, яка представляє собою набір алгоритмів визначення координат в БСПС.

У **третьому розділі** запропоновано використання, разом з безпроводними сенсорними вузлами, технічних засобів, що зазвичай входять до складу різного роду світло- і радіовіддалемірів та електронних тахеометрів, такі як мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно-кутових величин на основі частоти, фази та потужності сигналу, з метою створення на їх основі комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин.

Визначено принцип дії цифрового первинного перетворювача лінійно-кутових величин на основі миттєвих значень частоти (рисунк 2), що базується на квантуванні невідомого періоду сигналу T_x імпульсами зразкової частоти f_0 , що їх формує зразкова міра частоти (ЗМЧ).

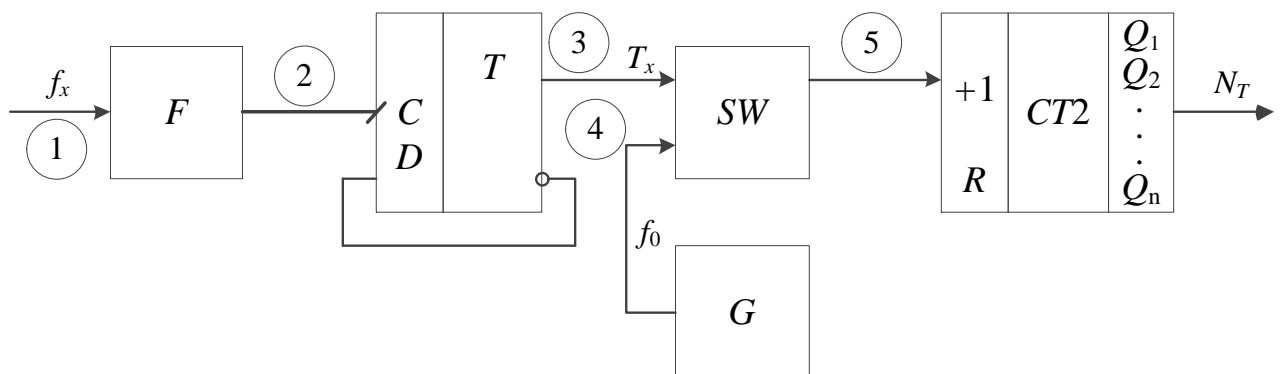


Рисунок 2 – Схема цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі миттєвих значень частоти

Запропонований засіб вимірювання вбудований в БСПС стандарту *ZigBee*. Для визначення відстані між вузлами пропонується метод *ToA* – *Time of Arrival*,

де лінійна відстань між двома вузлами визначається пропорційно періоду T , який потрібен, щоб сигнал поширився від одного пункту до іншого. Відстань між відправником і приймачем визначається за формулою відповідно до методу *ToA – Time of Arrival*.

Основними елементами приведеної структури є формувач F , пристрій виділення періоду ПВП, генератор зразкової частоти G , схема збігу SW , двійковий лічильник $CT2$, перетворювач коду NT/Nf і цифровий відліковий пристрій. Калібровані за амплітудою і тривалістю імпульси з виходу формувача F надходять на вхід пристрою виділення періоду.

Показано, що ПВП являє собою лічильний тригер T , на прямому виході якого з імпульсів із частотою f_x формується період T_x , що вимірюється. Період T_x у схемі збігу SW квантується імпульсами зразкової частоти f_0 .

Встановлено, що протягом кожного періоду T_x схема SW відкрита. Імпульси f_0 із виходу генератора G через відкриту схему SW надходять на вхід лічильника $CT2$. Графік перетворення сигналів у блоках подано на рис. 3.

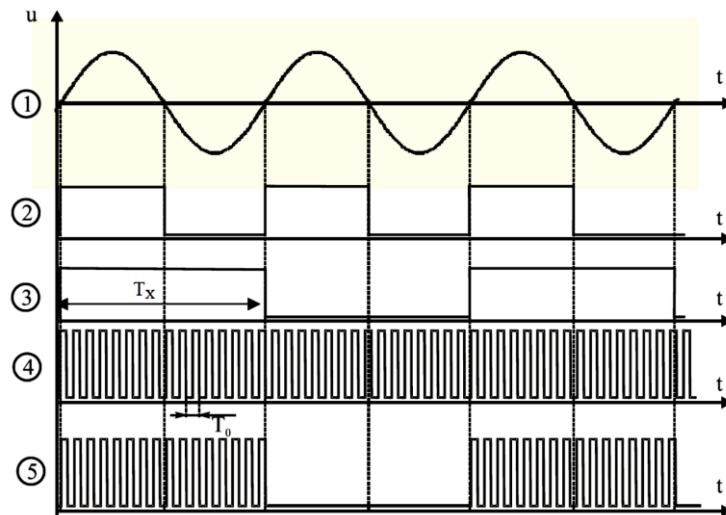


Рисунок 3 – Графік перетворення сигналів у блоках цифрового первинного перетворювача лінійно-кутових величин на основі миттєвих значень частоти

У лічильнику $CT2$ (рис. 2) після закінчення кожного періоду T_x формується код

$$N_T = \int_{t_1}^{t_2} T_0 dt = \frac{f_0}{f_x},$$

де T_0 – зразковий часовий інтервал, f_0 – зразкова частота, f_x – частота вхідного сигналу.

Останнє співвідношення є рівнянням перетворення цифрового первинного перетворювача лінійно-кутових величин на основі миттєвих значень частоти.

Розроблено математичну модель роботи цифрового первинного перетворювача лінійно кутових величин на основі миттєвих та середніх значень частоти, а також фази сигналу, що включає метод визначання відстані на основі часу отримання сигналу.

Обґрунтовано застосування методу вимірювання відстані між об'єктами БСПС на основі порівняння різниці потужностей відправленого та прийнятого сигналів.

У **четвертому розділі** розглянуто моделі та методи побудови комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин, в цілях контролю лінійних відстаней та розроблений методи підвищення їх метрологічних характеристик, а саме розширення діапазону вимірювання, зменшення похибки вимірювання лінійних розмірів та підвищення швидкодії процесу вимірювання.

Наведено оцінку похибки у визначенні моменту часу приходу переднього фронту імпульсу, з метою вимірювання відстані, викликану тепловим шумом, а також ефектом неоднорідності розподілу енергії в часі протягом проходження усього імпульсу.

Побудовано математичну модель вимірювання відстані, що базується на використанні огинаючої радіоімпульсу на виході приймаючого пристрою, що не залежить від значення несучого сигналу радіоімпульсу, з врахуванням рівномірності розподілу енергії в часі.

На рис. 4 по визначенню часу приходу імпульсу по передньому фронту – суцільною лінією зображена огинаюча незашумленого імпульсу, пунктирною – імпульсу з шумом. Горизонтальною пунктирною лінією вказано поріг компаратора.

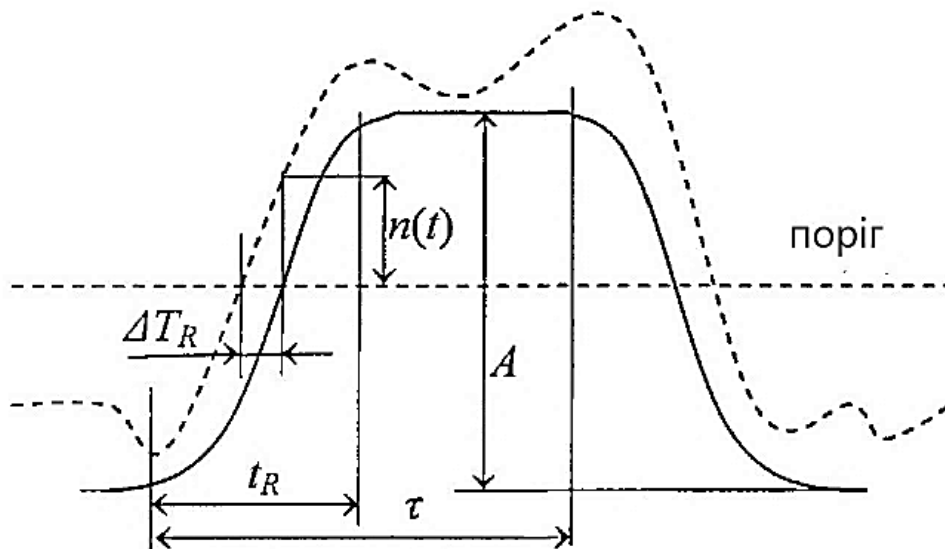


Рисунок 4 – Визначення часу приходу імпульсу по передньому фронту

На рис. 4 введені наступні позначення: $n(t)$ – зміщення імпульсу через шум за амплітудою, A – амплітуда прийнятого незашумленого імпульсу, ΔT_R – похибка вимірювання часу приходу імпульсу, t_R – тривалість переднього фронту імпульсу, τ – тривалість імпульсу при передачі. Тоді швидкість росту переднього фронту імпульсів в незашумленому S_1 і зашумленому S_2 випадках буде відповідно:

$$S_1 = \frac{A}{t_R}, S_2 = \frac{n(t)}{\Delta T_R}$$

Встановлено, що при великих амплітудах імпульсів швидкості росту S_1 та S_2 будуть рівні.

Отримано формулу визначення похибки вимірювання часу приходу імпульсу

$$\Delta T_R = \frac{n(t)}{A/t_R}, \text{ або } \sqrt{(\Delta T_R)^2} = \Delta T_R = \frac{t_R}{\sqrt{\frac{A^2}{n^2}}} = \frac{t_R}{\sqrt{\frac{2P}{N}}},$$

де $\frac{A^2}{n^2}$ відношення сигнал/шум для продетектованого імпульсу. Тут P – потужність сигналу, N – потужність шуму в смузі фільтру низьких частот (ФНЧ). Якщо B – смуга ФНЧ то

$$t_R = \frac{1}{B}.$$

Якщо

$$S = \frac{E}{\tau},$$

$N=N_0B$, де E – енергія імпульсу, що приймається, N_0 – спектральна густина потужності шуму. Тоді

$$\Delta T_R = \frac{\tau}{\sqrt{2B \frac{E}{N_0}}}.$$

Отримано похибку визначення часу тривалості переднього фронту імпульсу, що при полосі $B=5 \times 10^7$ Гц, $\tau = 10^{-7}$ с, $\frac{E}{N_0} = 20 \text{ дБ} = 100$, становить $\Delta T_R \approx 3 \cdot 10^{-9}$ с.

Визначено, що вплив ефекту неоднорідності розподілу енергії в хаотичному імпульсі за часом схожий з впливом білого гаусового шуму. Тому, оцінивши співвідношення «сигнал/шум» викликане цим ефектом можна порівняти його з співвідношенням сигнал/шум викликаним білим шумом і підставляти в розрахунки менше з цих двох відношень.

Побудовано графову модель БСПС на основі приладів технології ZigBee/802.15.4, що має три класи пристроїв: FFD-пристрої маршрутизації (*Full Function Device* – пристрій з повним комплектом функцій – R), пристрої-координатори (якірні вузлові пристрої) (*Coordinators* – FFD з додатковими ресурсами системи залежно від складності БСПС – C) і RFD-кінцеві пристрої (*Reduced Function Device* – пристрій з обмеженим набором функцій – E) (див. рис. 5.)

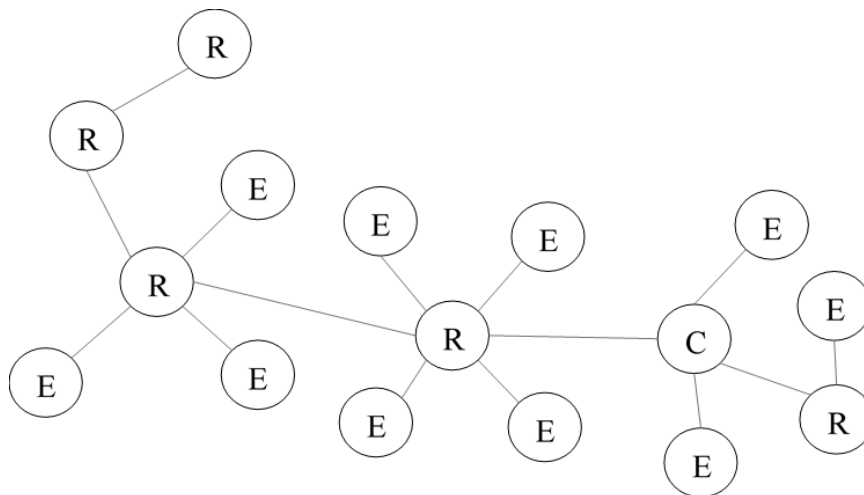


Рисунок 5 – Графова модель БСПС

Модернізовано структурну схему пристрою координатора (С) для БСПС, шляхом включення в її склад блоків лазерного віддалеміра. Що дає можливість отримати альтернативне значення відстані між об'єктами.

Розроблено комп'ютеризований лазерний далекомір з сенсорним мережевим інтерфейсом, що застосовується у якості пристрою координатора (С), що є якірним вузловим пристроєм сегменту БСПС. На рис. 6 представлена розроблена структурна схема даного далекоміра, що поєднує в собі класичний лазерний віддалемір та інтерфейс БСПС, що дозволяє використовувати функцію визначення відстані між об'єктами сенсорних приладів.

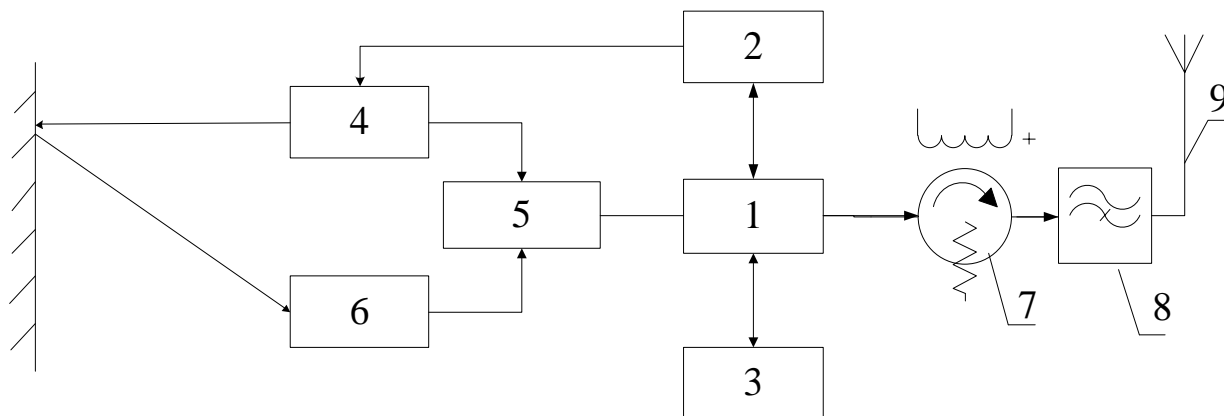


Рисунок 6 – Комп'ютеризований лазерний далекомір з сенсорним мережевим інтерфейсом: 1 – керуючий комп'ютеризований блок (що містить модуль GPS, LTE (4G) модем та модуль пам'яті); 2 – елемент живлення; 3 – сенсорний блок; 4 – напівпровідниковий лазер; 5 – блок вимірювання часових інтервалів; 6 – фотодіод-приймач; 7 – високочастотний фазовий модулятор; 8 – фільтр Гауса; 9 – антена

Порядок роботи даної приладової системи такий: керуючий блок 1 здійснює керування живленням, визначає відстань до потрібного об'єкта на основі співставлення часу направлення променя та часу його відбиття. Також він співставляє дані, що отримані GPS-модулем та з інтернету, де він отримує свої координати відносно карти місцевості. Таким чином він визначає свою позицію відносно 4 альтернативних джерел та надсилає команду про відправку пакета та сам пакет, що містить результати вимірювань, передані сенсорним блоком 3 та фотодіодом-приймачем 6. Високочастотний фазовий модулятор 7 перетворює пакет на впорядкований потік електромагнітних сигналів, кодованих по фазі, та надсилає до фільтра Гауса 8 (цей процес буде більш детально розглянуто у наступному підрозділі), де сигнали накладаються на несучу частоту та через антену 9 відправляється в радіоефір. Елемент живлення 2 через керуючий блок 1 здійснює живлення постійним електричним струмом комп'ютеризований лазерний віддалемір з сенсорним мережевим інтерфейсом. Це забезпечує його автономність та функціональність на протязі достатнього періоду часу.

Запропоновано метод підвищення точності комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин, що полягає у одночасному використанні даних вимірювання лазерного віддалеміра та показників, що отримані завдяки функції локалізації об'єктів безпроводних сенсорних мереж. Ці дві функції поєднані у приладі, що зображений на рис. 6, де блоки 2, 4 – 6 виконують

функції лазерного далекоміра, а 1, 3, 7 – 9 – функції комп'ютеризованого сенсорного пристрою.

Розроблено новий та удосконалено існуючий метод зменшення похибки вимірювання лінійних відстаней, що базується на використанні радіоімпульсу.

Запропонована функціональна схема роботи блоків лазерного віддалеміра відображена рис. 7.

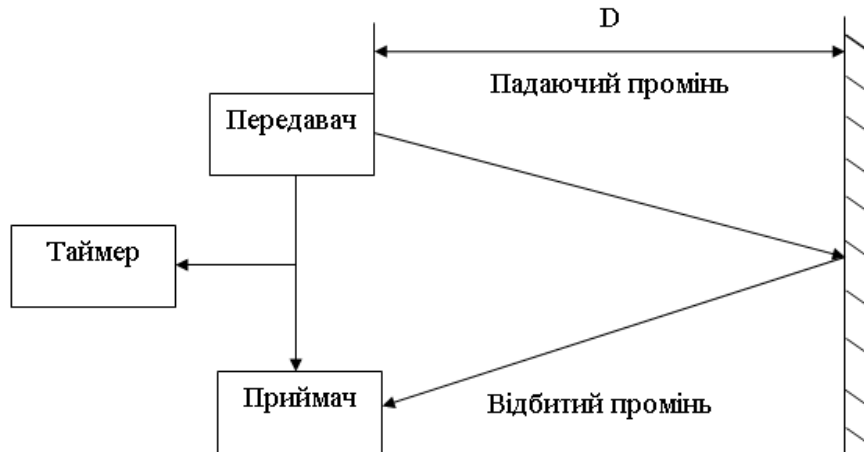


Рисунок 7 – Функціональна схема розробленого лазерного далекоміра

Обґрунтовано визначення відстані до об'єкту на основі імпульсного методу, що визначається за наступною формулою:

$$D = \frac{ct}{2n}, \quad (1)$$

де D – відстань до об'єкта; c – швидкість світла у вакуумі; n – показник переломлення середовища, в якому розповсюджується випромінювання; t – час проходження імпульсу до цілі і назад (табл. 1).

Таблиця 1

Час проходження імпульсу до об'єкта вимірювання

Параметри	Показники параметрів					
Відстань до цілі, м	1	10	100	10^3	10^4	10^5
Час відгуку, с	$6,7 \cdot 10^{-9}$	$6,7 \cdot 10^{-8}$	$6,7 \cdot 10^{-7}$	$6,7 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$

Співвідношення (1) показує, що потенціальна точність вимірювання дальності визначається точністю визначення часу проходження імпульсу енергії до об'єкту і в зворотному напрямку.

Обґрунтовано, що розроблений лазерний далекомір містить електронний теодоліт (кутомір), електронний далекомір, GPS-приймач, а також обчислювальний пристрій з пам'яттю, для вимірювання похилих відстаней до заданих точок, горизонтальних і вертикальних кутів, та перетворення результатів із сферичної до декартової системи координат, то можна сказати, що даний пристрій поєднує в собі функції тахеометра, що має можливість вимірювати лінійно-кутові параметри в зонах непрямої видимості, на відміну від класичнинго. Прилад, який функціонує у складі КССВМВ, відрізняється від

стандартного тахеометра тим, що не тільки може вимірювати відстань до об'єкта зі своєї позиції, але і отримувати інформацію про позицію сенсорного приладу. Таким чином він аналізує відстань до об'єкта, маючи 2 альтернативних значення.

Розроблено модель кінцевого пристрою БСПС, що відрізняється тим, що сенсорний блок дає змогу надавати керуючому блоку дані про локалізацію, що можуть містити похибку ($\delta=0,2$), а також елемент живлення, що забезпечує автономність пристрою.

Запропоновано використовувати метод вимірювання відстані між об'єктами, на основі падіння рівня радіосигналу між сенсорами, використовуючи мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно-кутових величин на основі падіння потужності сигналу, в сенсорному комп'ютеризованому приладі вимірювання відстані.

Розглянуто застосування методу перебудови частоти (FHSS – Fast rate frequency hopping) і дворівневу частотну модуляцію з фільтром Гауса (GFSK – Gaussian Frequency Shift Keying) для радіообміну показниками вимірювань в БСПС.

Введення в пристрій (рис. 6) сенсорного блоку та елемента живлення вигідно відрізняє запропонований безпроводний сенсорний прилад вимірювання відстані між об'єктами з функцією підвищення якості передавання даних в зонах невпевненого прийому від прототипу, оскільки в прототипі відбувається лише прийняття рішення про зміну умов передавання даних за необхідністю. В запропонованому пристрої крім знаходження оптимальних рішень для подальшого передавання даних, відбувається збір даних про положення сенсорного приладу відносно інших, що дає змогу вимірювати відстань між об'єктами БСПС, а також міститься елемент живлення, що робить його автономним пристроєм.

Розроблено структурну схему безпроводного сенсорного приладу рис. 8 вимірювання відстані між об'єктами з функцією підвищення якості передавання даних в зонах невпевненого прийому.

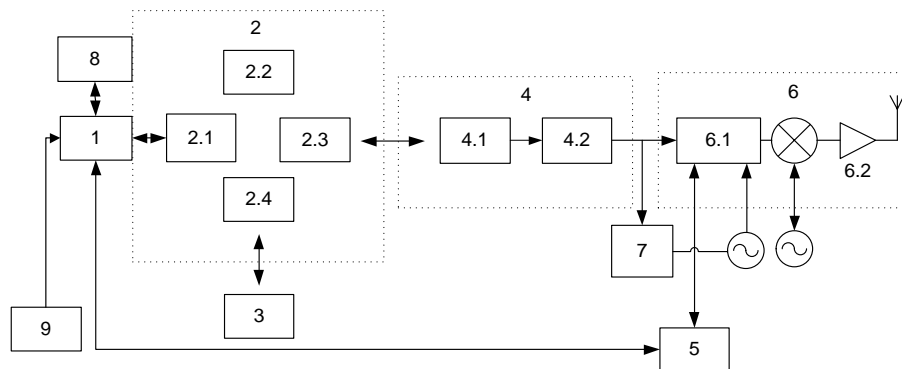


Рисунок 8 – Безпроводний сенсорний прилад вимірювання відстані між об'єктами з функцією підвищення якості передавання даних в зонах невпевненого прийому (у якості кінцевого пристрою БСПС)

Запропоновано безпроводний сенсорний (див. рис. 8) прилад вимірювання відстані між об'єктами з функцією підвищення якості передавання даних в зонах невпевненого прийому, що містить керуючий блок 1, модуль підрівня LLC канального рівня моделі OSI 2, блоку хост інтерфейсу 2.1, вбудованого мікроконтролера 2.2, блоку додатку прийомо/передавача 2.3, блоку шинного інтерфейсу 2.4, пам'яті 3, модулю підрівня MAC канального рівня OSI 4, контролера смуги частот 4.1, радіочастотного прийомо/передавача 4.2, аналізатора сигналу 5 (роль якого може виконувати мікропроцесорний первинний перетворювач лінійно-кутових величин на основі потужності сигналу), модуля фізичного рівня OSI 6, інтерфейсу фізичного рівня 6.1, антени 6.2., блоку автоматичного налаштування частоти 7, сенсорний блок 8, елемент живлення 9. Потужність, прийнята приймальною антеною в моделі вільного простору визначається за формулою Фрісса для вільного простору.

Аналізатор сигналу 5 постійно відстежує інформацію про стан передавання даних. Він відсилає відповідні запити до інтерфейсу фізичного рівня 6.1 та отримує від нього інформацію про стан передавання показників вимірювання відстані.

Керуючий блок 1 здійснює керування живлення, а також надсилає команду про відправку пакета та сам пакет, що містить результати вимірювань, передані сенсорним блоком 8, що надійшли від сенсорного блоку, на модуль підрівня LLC канального рівня моделі OSI 2. В даному модулі через блок хост-інтерфейсу 2.1, пройшовши відповідні перетворення, за допомогою додатків даного модуля, пакет стає фреймом. Після чого вбудований мікроконтролер 2.2 передає фрейм до блоку додатку прийомо/передавача 2.3 та через блок шинного інтерфейсу 2.4 записує дані про стан передавання до пам'яті 3, де вони ще певний час зберігаються.

Блок додатку прийомо/передавача 2.3 спрямовує фрейм до модуля підрівня MAC канального рівня OSI 4. В даному модулі контролер смуги частот 4.1 підбирає для даного фрейму оптимальний діапазон частот, та спрямовує фрейм до радіочастотного прийомо/передавача 4.2. В даному модулі відбувається як перетворення фрейму у електромагнітні коливання та й їх модуляція відповідно до вмісту фрейму.

Після цього коливання передаються до модулю фізичного рівня OSI 6, а інформація про підібраний блоком 4.1 діапазон частот передається до блоку автоматичного налаштування частоти 7. Блок 6.1 накладає електромагнітні коливання на частоту, яка налаштовується блоком автоматичного налаштування частоти 7. Коливання спрямовуються до антени 6.2, яка передає сигнал до радіоефіру.

Радіообмін відбувається у смузі частот (2400 – 2483,5) МГц ISM-діапазону. У радіотракті застосований метод розширення спектру шляхом імпульсної перебудови частоти (*FHSS – Fast rate frequency hopping*) і дворівнева частотна модуляція з фільтром Гауса (*GFSK – Gaussian Frequency Shift Keying*). Імпульс – моноцикл Гауса описується функцією

$$V(t) = A \frac{\sqrt{2}e}{\tau} t e^{-(t/\tau)^2}, \quad (2)$$

де A – амплітуда імпульсу; τ – часова константа, що характеризує згасання (тривалість імпульсу $2\pi\tau$). Спектральна щільність сигналу визначається функцією:

$$V(\omega) = A\omega\tau^2\sqrt{2\pi e}. \quad (3)$$

Середня частота сигналу обчислюється за формулою:

$$f_c = 2\pi\tau,$$

де τ – часова константа, що характеризує згасання.

Метод частотних імпульсів передбачає, що вся відведена для передавання смуга частот ділиться на певну кількість підканалів шириною 100 кГц кожен. Канал являє собою псевдовипадкову послідовність імпульсів по 79 або 23 радіочастотних підканалів.

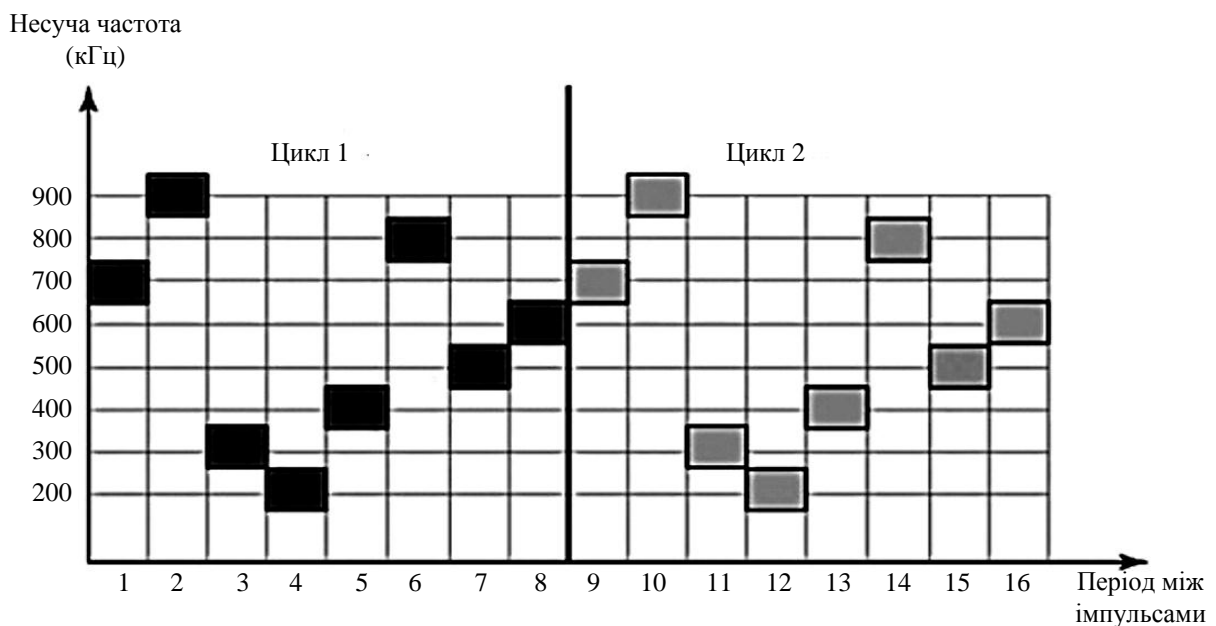


Рисунок 9 – Графік циклів алгоритму FHSS

Кожен канал поділяється на тимчасові інтервали тривалістю 625 мкс, причому кожному сегменту відповідає певний підканал. Передавач в кожен момент часу використовує тільки один підканал. Ці імпульси здійснюються синхронно в передавачі і приймачі із заздалегідь зафіксованою псевдовипадковою послідовністю.

Встановлено, що за секунду може відбуватися до 1600 частотних імпульсів. Потужність передавача ділиться на 3 класи: 1) 100 мВт (20 дБм); 2) 2.5 мВт (4 дБм); 3) 1 мВт (0 дБм), що забезпечує конфіденційність і завадостійкість передавання показників вимірювання відстані в приладовій системі вимірювання механічних величин.

Розроблено метод згорткового (*PBSS*) кодування, як технологію для покращення якості передавання показників вимірювання відстані в приладовій системі вимірювання механічних величин при падінні стану сигналу, що застосовується в пристрої рис. 8.

Ідея згорткового кодування показників вимірювання відстані полягає в наступному. Послідовність вхідних інформаційних бітів, з сукупності яких

формується пакет, що містить поточний показник вимірювання відстані, перетворюється в згортковому кодері так, щоб кожному вхідному біту відповідало більш ніж 1 вихідний. Тобто згортковий кодер додає певну надлишкову інформацію до початкової послідовності.

Якщо, кожному вхідному біту відповідають два вихідних, то швидкість кодування складає $r = 1/2$.

Якщо ж кожним двом вхідним бітам відповідають три вихідних, то швидкість згорткового кодування складатиме вже $2/3$.

Будь-який згортковий кодер, що застосовується в БСПС вимірювання механічних величин, будується на основі декількох послідовно пов'язаних запам'ятовуючих осередків і логічних елементів *XOR*.

Кількість осередків визначає кількість можливих станів кодера.

Запропоновано у згортковому кодері БСПС вимірювання відстані, що використовує шість осередків, зберігати інформацію про шість попередніх показників вимірювання та станів сигналу, що були в момент їх передавання, а з урахуванням значення вхідного біта, отримуємо, що в такому кодері використовується сім бітів вхідної послідовності. Такий згортковий кодер називається кодером на сім станів ($K = 7$).

Показано, що вихідні біти кожного з показників вимірювання відстані, що формуються в згортковому кодері, визначаються операціями *XOR* між значеннями вхідного біта і бітами, що зберігаються в комірках пам'яті, тобто значення кожного формованого вихідного біта залежить не лише від інформаційного біта, що входить, але і від декількох бітів попередніх показників вимірювання відстані, що дає змогу оцінити похибку не лише поточного показника, але і порівняти її з похибками 6 попередніх показників. У технології *PBSS*, що використовується в даній БСПС вимірювання механічних величин згортковий кодер на сім станів ($K = 7$) із швидкістю $r = 1/2$. Схема такого кодера показана на рис 10.

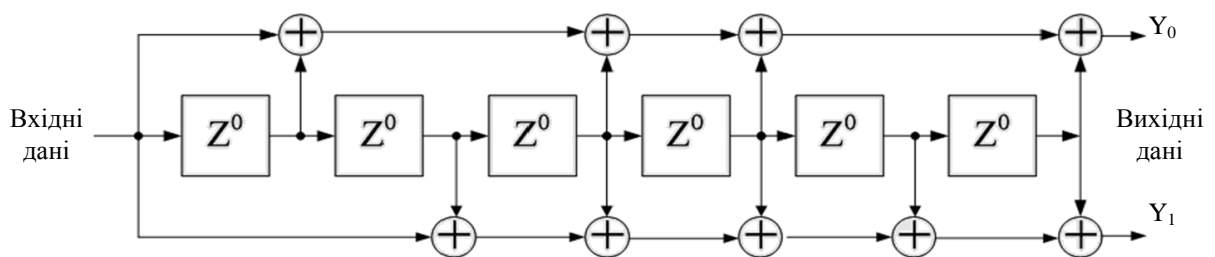


Рисунок 10 – Схема згорткового кодера, що застосовується в кодуванні *PBSS* ($K = 7$, $r = 1/2$) для БСПС вимірювання відстані

Головною перевагою згорткових кодерів є завадостійкість формованої ними послідовності: навіть у разі виникнення помилок прийому початкова послідовність показників вимірювання відстані буде безпомилково відновлена.

Запропоновано для відновлення початкової послідовності бітів, з яких формуються пакети показників вимірювання на стороні приймача, застосовувати декодер Витербі, що дає можливість приладовій системі аналізувати похибку не тільки поточного показника, але і порівнювати з

похибками 6 попередніх показників вимірювання та забезпечує похибку вимірювання в межах $\Delta=(10^{-2} - 10^{-3})$ м.

Досліджено особливості даного пристрою при його використанні у складі БСПС вимірювання механічних величин. За допомогою засобу моделювання безпроводних систем спеціального призначення *Motorola lan planer*, розраховано зниження дальності передавання даних, в залежності від механічних перешкод, а також пов'язані з цим втрати пропускної спроможності при передачі показників вимірювання відстані.

Для підтвердження одержаних результатів побудовано графік (рис. 11).

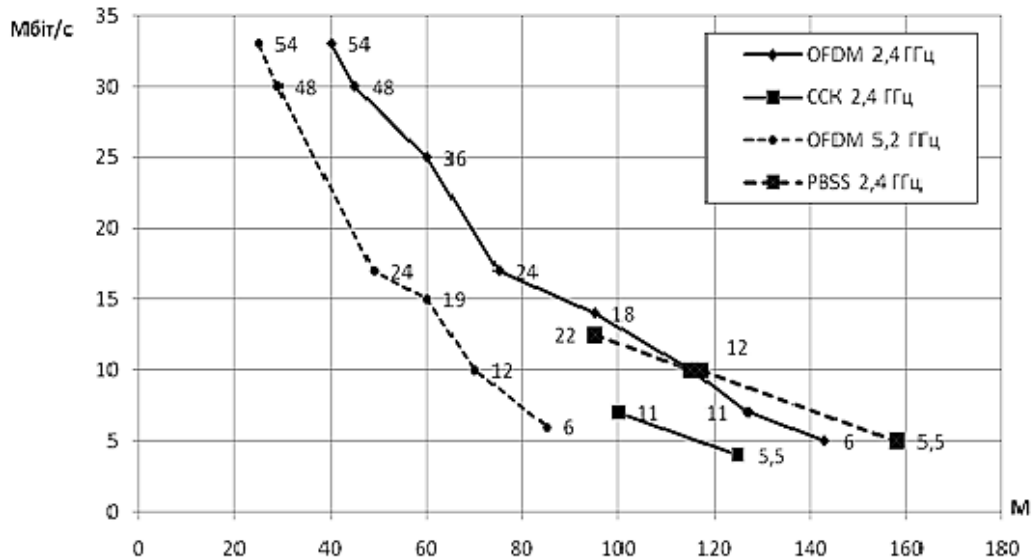


Рисунок 11 – Залежність фактичної швидкості передавання від відстані між об'єктами

На даному графіку видно, що при переході на метод кодування *PBSS*, 2,4 ГГц (виділено жирним шрифтом), максимальна дальність вимірювання збільшується у порівнянні з технологією *OFDM*, 2,4 ГГц, приблизно на (15 – 17) м. Для пристроїв, що при цьому залишаться працювати на стандарті *IEEE 802.15.4*, фактична швидкість передачі показників вимірювання буде сягати майже 18 Мбіт/с.

Встановлено, що введення в пристрій передавання даних додаткового блоку цілком виправдане, щодо питання збільшення дальності передавання показників вимірювань.

У **п'ятому розділі** Оцінено похибку вимірювання механічних величин на основі перетворення показників частоти, при аналізі високих і низьких частот. Визначено, що при дослідженнях періодичних процесів у широкому діапазоні частот для досягнення заданої точності доцільно в діапазоні високих частот застосовувати цифровий первинний перетворювач лінійно-кутових розмірів на основі частоти (ППЛКРЧ), а в діапазоні низьких частот переходити до вимірювання періоду.

Проведено дослідження та побудовано графіки похибок квантування при вимірюванні частоти та періоду.

Побудовано алгоритм роботи мікропроцесорного ППЛКРЧ, що дозволяє досліджувати періодичні процеси у широкому діапазоні.

Проведено аналіз похибки квантування цифрового ППЛКРЧ та визначено верхню і нижню межу вимірювань.

Проаналізовано принцип роботи цифрового ППЛКРЧ та встановлено, що різницю часу між ультразвуковим та радіосигналом, яка використовується для визначення відстані між об'єктами, можна визначити за різницею періодів цих сигналів. Для даного дослідження було обрано мікропроцесорний ППЛКРЧ NM8051/1. Цей пристрій має невеликі габарити і розміщується в корпусі від будь-якого плоского маркера, параметри якого представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Технічні характеристики мікропроцесорного ППЛКРЧ NM8051/1

Назва характеристики	Показники характеристик
Напруга живлення U , В	5
Струм живлення I , мА	10
Коефіцієнт ділення	1000
Діапазон вимірювань частот f , МГц	1 ... 1300
Вхідна чутливість, В	0,15 ... 0,2

Розроблена принципова схема мікропроцесорного ППЛКРЧ NM8051/1, що зображена на рис. 12.

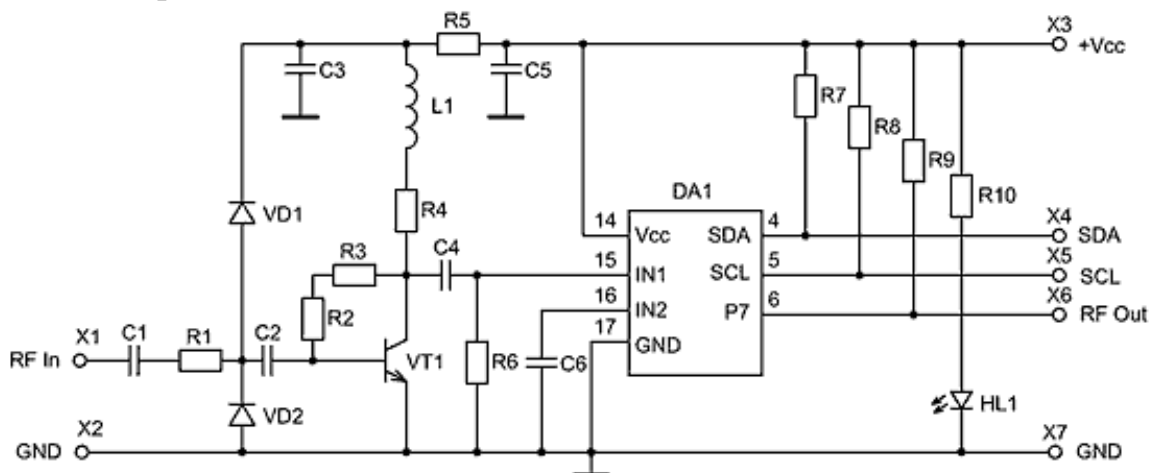


Рисунок 12 – Принципова схема мікропроцесорного ППЛКРЧ NM8051/1

Виготовлено мікропроцесорний первинний перетворювач, на основі даної принципової схеми, на текстолітовій друкованій платі (рис. 13).



Рисунок 13 – Зовнішній вигляд мікропроцесорного ППЛКРЧ NM8051/1

Встановлено, що при безпосередньому (прямому) вимірюванні частоти періодичного сигналу найвагомішими є дві складові похибки – похибка вимірювання і похибка порівняння показників частоти.

Похибка вимірювання частоти зумовлена нестабільністю частоти кварцового генератора. Ця складова похибки може бути відчутною при вимірюванні надвисоких частот.

Похибка порівняння показників частоти головним чином визначається похибкою квантування частоти δ_k . При вимірюванні низьких частот похибка квантування є визначальною складовою похибки вимірювання. При вимірюванні частоти $f_x = 10$ Гц при $t_0 = 1$ с, максимальна похибка квантування складає

$$\delta_{kч} = \frac{100\%}{f_x t_0} = 10\%.$$

Визначено, що через великі похибки квантування низькі частоти безпосередньо вимірюються цифровим ППЛКРЧ із невисокою точністю.

Запропоновано 4 способи зменшення похибки квантування при вимірюванні частоти:

1. Збільшення тривалості зразкового часового інтервалу t , тобто часу вимірювання. Але можливості такого способу обмежені, оскільки для одержання малої похибки квантування (наприклад, $\delta_k = 0,01\%$; $f_x = 10$ Гц) потрібний дуже великий час вимірювання:

$$t_0 = \frac{100\%}{\delta_{kч} f_x} = 10^3 \text{ с};$$

2. Збільшення числа імпульсів, які квантують зразковий часовий інтервал t_0 , що досягається множенням вимірюваної частоти f_x . Використання даного способу поєднано із застосуванням додаткового блока помножувача частоти, що ускладнює і підвищує вартість апаратурної частини;

3. Врахування випадкової природи похибки квантування. Забезпечується проведення багаторазових вимірювань і усереднення їх результатів. Це ефективний шлях зменшення впливу випадкової похибки на результат вимірювання;

4. Безпосереднє вимірювання періоду досліджуваного сигналу з наступним обчисленням частоти $f_x = 1/T_x$, що дозволяє значно зменшити похибку квантування при вимірюванні низьких частот. Даний ефект було досягнуто при частоті $f_x = 10$ Гц та періоді $T_x = 0,1$ с. Сформовано стробувальний імпульс тривалістю, що дорівнює періоду T_x , а також його проквантовано імпульсами, частота проходження яких $f_0 = 10$ МГц (що має місце в цифрових ППЛКРЧ). У цьому разі похибка квантування

$$\delta_{кп} = \frac{100\%}{T_x f_0} = \frac{100\%}{0,1 \cdot 10^7} = 10^{-4}\%.$$

Показано, що непряме вимірювання частоти $f_x = 1/T_x$ дозволило значно підвищити точність порівняно з прямим вимірюванням частоти: похибка квантування зменшилась у 10^5 разів.

Встановлено, що при вимірюванні високих частот (наприклад, $f_x = 106$ Гц, $t_0 = 1$ с, $f_0 = 10$ Гц) похибка квантування цифрового ППЛКРЧ

$$\delta_{\kappa\chi} = \frac{100\%}{t_o f_x} = \frac{100\%}{0.1 \cdot 10^6} = 10^{-4}\%,$$

а похибка квантування цифрового вимірювача часових інтервалів надмірно зросте:

$$\delta_{\kappa\chi} = \frac{100\% f_x}{f_o} = \frac{100\% \cdot 10^6}{10^7} = 10\%.$$

Результати даних досліджень у таблиці 3.

Таблиця 3

Результати квантування похибок вимірювача часових інтервалів і ППЛКРЧ

Назва параметру	Опис експерименту			
	Вхідні дані	Прилад	Формули для обчислення	Значення вимірювань
Час вимірювання (t_0)	$\delta_{\kappa\chi} = 0,01\%;$ $f_x = 10$ Гц	Вимірювач часових інтервалів, ППЛКРЧ	$t_0 = \frac{100\%}{\delta_{\kappa\chi} f_x}$	1000 с
Похибка квантування частоти ($\delta_{\kappa\chi}$)	$f_x = 10$ Гц, $t_0 = 1$ с	Вимірювач часових інтервалів, ППЛКРЧ	$\delta_{\kappa\chi} = \frac{100\%}{f_x t_0}$	10%
	$f_x = 106$ Гц, $t_0 = 1$ с, $f_0 = 10$ Гц	Вимірювач часових інтервалів	$f_x = 1/T_x,$ $\delta_{\kappa\chi} = \frac{100\% f_x}{f_o}$	10%
		ППЛКРЧ	$\delta_{\kappa\chi} = \frac{100\%}{t_o f_x}$	$10^{-4}\%$
Похибка квантування періоду ($\delta_{\kappa\chi}$)	$T_x = 0,1$ с, f_0 $= 10$ МГц	ППЛКРЧ	$\delta_{\kappa\chi} = \frac{100\%}{T_x f_0}$	$10^{-4}\%$

Отримані результати експерименту з похибками квантування зображені детальніше на рис.14.

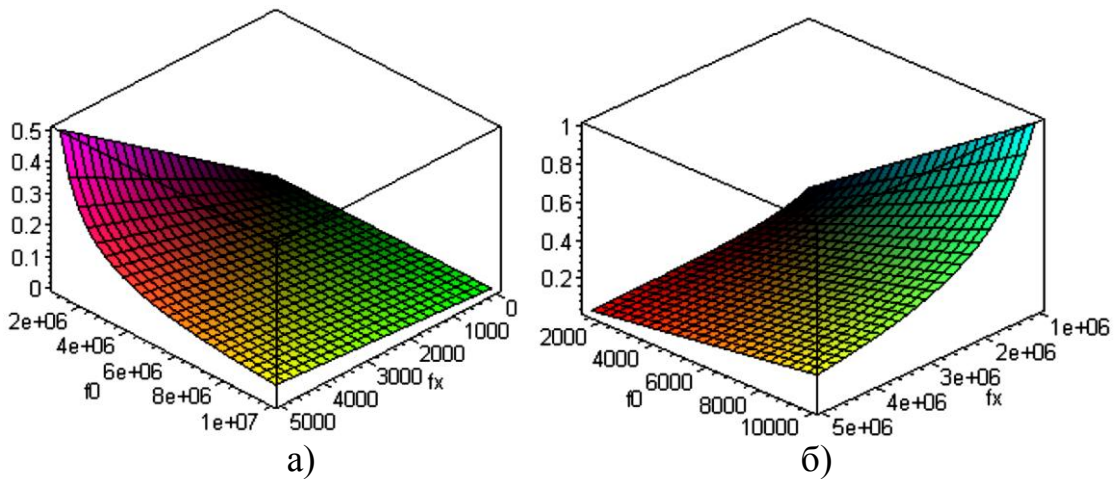


Рисунок – 14 Похибка квантування: а) вимірювача періоду; б) вимірювача частоти

Встановлено, що при дослідженнях періодичних процесів у широкому діапазоні частот для досягнення заданої точності доцільно в діапазоні високих частот застосовувати цифровий ППЛКРЧ, а в діапазоні низьких частот переходити до вимірювання періоду. Визначено, що значення похибки квантування δ_{kT} цифрового вимірювача часових інтервалів обернено пропорційне невідомому періоду сигналу та зразковій частоті:

$$\delta_{kT} = \frac{1}{N} 100\% = \frac{1}{T_x f_0} 100\% = \frac{f_x}{f_0} 100\%.$$

Визначено, на основі аналізу рівняння похибки квантування (рис.15.), що шляхом для зменшення δ_{kT} є збільшення частоти квантування f_0 і вимірюваної величини T_x .

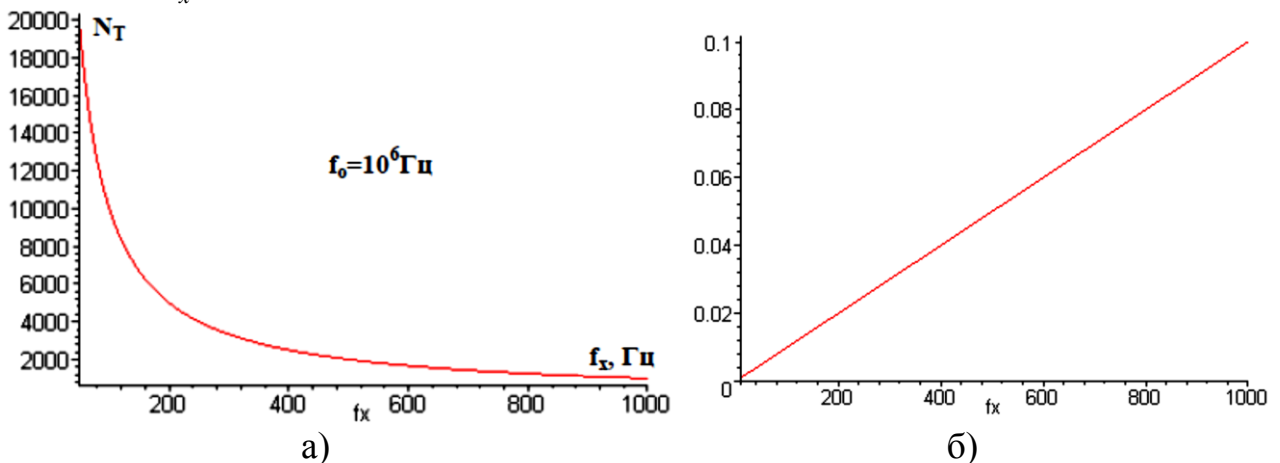


Рисунок 15 – Дослідження цифрового частотоміра: а) статична характеристика; б) аналіз рівняння похибки квантування

Визначено, що збільшення частоти f_0 обмежене швидкодією елементної бази, на якій реалізується ППЛКРЧ, тому, для зменшення похибки квантування для фіксованих T_0 і T_x (рис. 2) квантується не один, а від 5 до 10 періодів частоти вхідного сигналу.

Показано, що крім похибки квантування в частотомірі миттєвих значень виникає похибка $\delta_{змч}$, яка зумовлена неточністю первинного встановлення частоти генератора G , її часовою і температурною нестабільностями, а також похибкою вимірювання періоду. Доповнивши структуру вимірювача часових

інтервалів перетворювачем N_T/N_f , в якому виконується операція $1/T_x$, одержують схему цифрового частотоміра миттєвих значень.

Визначено нижню і верхню межі вимірювання частоти $f_{x\min}$. Нижня межа вимірювань обмежена максимальною ємністю двійкового лічильника та визначається за формулою

$$f_{x\min} = \frac{f_o}{2^n},$$

де f_o – зразкова частота, n – ємність двійкового лічильника (кількість комірок).

Отримана верхня межа вимірювання частоти $f_{x\max}$, що задана нормованим значенням похибки квантування $\delta_k = \delta_{\text{кн}}$, що складає

$$\delta_{\text{кн}} = \frac{f_{x\max}}{f_o} 100\% \Rightarrow f_{x\max} = \frac{\delta_{\text{кн}} f_o}{100\%}.$$

Представлені експериментальні дослідження комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин, а саме: лінійно-кутових, розмірів, часу, переміщення та швидкості. Побудовані їх моделі та функціональні схеми. Запропоновано використовувати безпроводні сенсорні модулі XBee серії S2 S2C ZigBee (рис. 16), у якості кінцевого пристрою. Відповідно до технічної документації та стандарту вони мають похибки вимірювання відстані, що відображені в табл. 4.

Таблиця 4

Залежність похибки локалізації (Δd) від відстані між сусідніми модулями (d) та похибкою визначення часу отримання сигналу (ΔT_{reply})

Відстань $d, \text{ м}$	$\Delta d (\Delta T_{\text{reply}} = 20 \text{ ns}), 10^{-3} \text{ м}$	$\Delta d (\Delta T_{\text{reply}} = 200 \text{ ns}), 10^{-3} \text{ м}$	$\Delta d (\Delta T_{\text{reply}} = 2 \text{ } \mu\text{s}), 10^{-3} \text{ м}$	$\Delta d (\Delta T_{\text{reply}} = 20 \text{ } \mu\text{s}), 10^{-3} \text{ м}$
0,1	± 0.012	± 0.12	± 1.2	± 12
1	± 0.012	± 0.12	± 1.2	± 12
10	± 0.05	± 0.12	± 1.2	± 12
100	± 0.4	± 0.4	± 1.2	± 12
1000	± 4	± 4	± 4	± 12
10000	± 40	± 40	± 40	± 40

Сенсорний прилад стандарту ZigBee зображено на рис. 15.

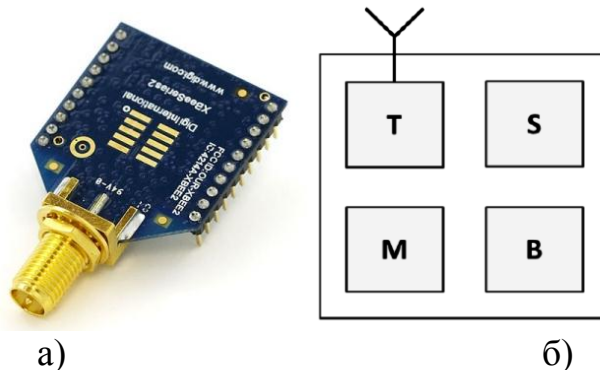


Рисунок 16 – Зовнішній вигляд сенсорного модуля (а) та модель (б): Т – радіочастотний трансивер; М – мікроконтролер; В – джерело живлення; S – сенсор

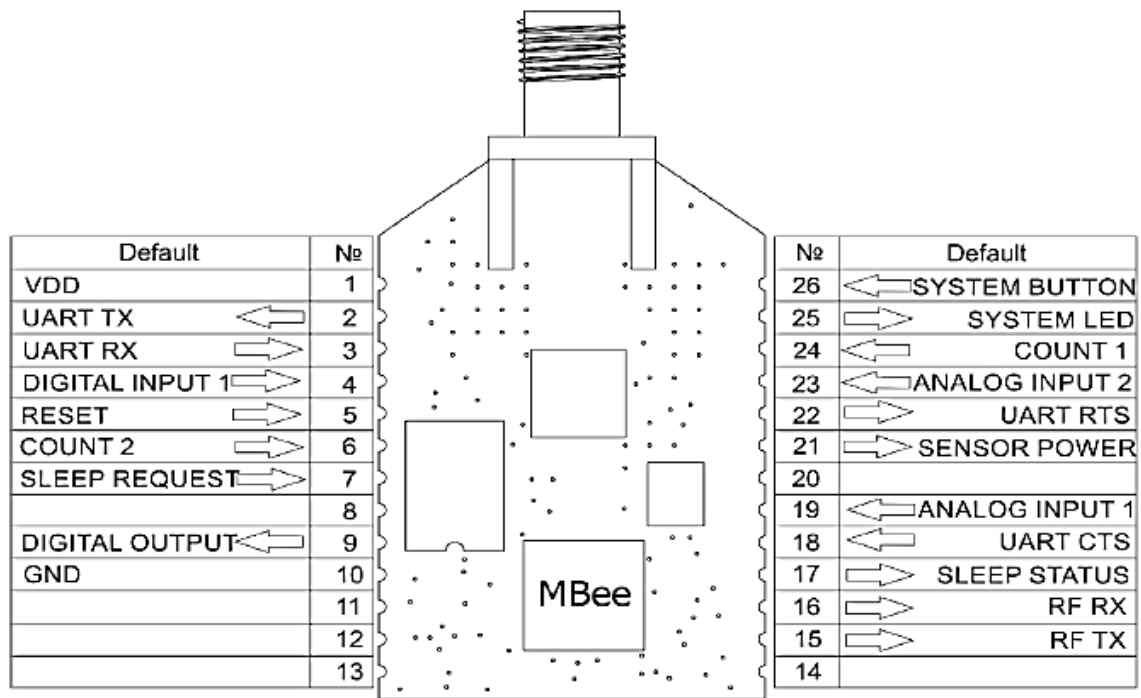


Рисунок 17 – Принципова схема сенсорного модуля
 Технічні характеристики даного приладу представлено у таблиці 5.

Таблиця 5

Технічні характеристики модуля XBee серії S2 S2C ZigBee

Вид характеристики	Назва характеристики	Значення характеристики
Радіочастотні характеристики	Протокол верхнього рівня	ZigBee PRO
	Робочий діапазон частот	(2,405 – 2,480) ГГц
	Програмована вихідна потужність передавача	До 21 дБм для модулів MBee-2.4-2.1 і до 4 дБм для модулів MBee-2.4-3.x
	Чутливість приймача	-103 дБм
	Швидкість передачі даних	до 250 Кбіт/с
	Тип модуляції	O-QPSK
Електричні характеристики	Напруга живлення	2,0 В - 3,6 В
	Струм в режимі передачі	130 мА
	Струм в режимі прийому	31 мА
	Струм в режимі очікування	1,6 мкА
	Струм в режимі спокою	не менше 0,4 мкА
	Максимальна напруга низького рівня на цифрових входах	0,5 В
	Мінімальна напруга високого рівня на цифрових входах	2,5 В

Запропоновано для моделювання процесу визначення позиції об'єктів застосовувати метод обмеження квадрату у системі *MATLAB*. Побудовано

модель БСПС M з кількістю вузлів $i = 200$ (отримаємо $M=1, \dots, 200$). Число опорних вузлів (якірних, або концентраторів) складало 10 % ($B=20$).

Показано, що відстань до кожного сусіднього об'єкта у складі приладової системи вимірювання механічних величин (від i до j) $d_{ij}=35$ м – фіксований радіус передавання (d_{ij} – відстань від об'єкта i до сусіднього об'єкта j). Фіксований радіус передавання і вимірювання відстані від об'єкта i до сусіднього об'єкта j – різні параметри. При моделюванні в системі *MATLAB*, об'єкти на координатній площині розподілялись за рівномірним законом розподілу. Після чого відбувається обчислення відстані від опорних об'єктів, позиція яких є відомою, до сусідніх, і вираховуються їх приблизні координати. Далі, відповідно до структури, ця інформація надходить до сусідніх об'єктів де враховується для визначення вже їх позиції. При цьому точність локалізації об'єкта залежить від кількості опорних об'єктів поряд з ним, а також від його віддаленості від сусідніх об'єктів. Тому результати локалізації сусіднього з опорним об'єкта будуть значно точніші, ніж вузлового приладу, шлях до якого від опорного приладу містить кілька проміжних об'єктів.

На рисунку 18а зображено розміщення 200 об'єктів, розташування яких генерується випадковим чином. Знаком «*» зображено опорні об'єкти БСПС вимірювання механічних величин. На рисунку 18б зображено локалізовану БСПС, у вигляді впорядкованої структури, а також визначено всі об'єкти на площі (250x250) м.

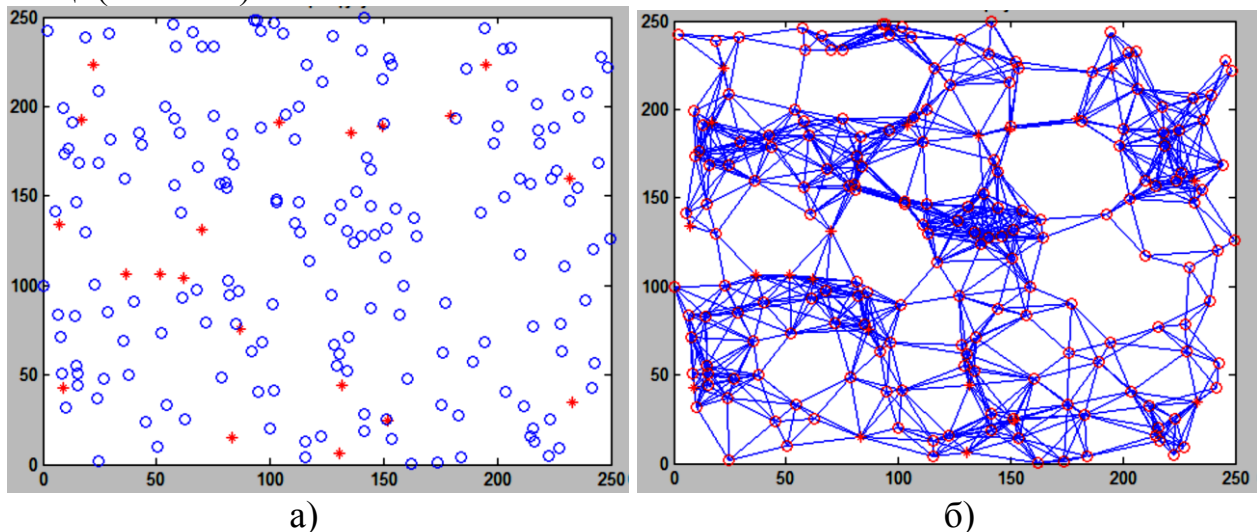


Рисунок 18 – Розгортання БСПС: а) Розташування об'єктів; б) Зв'язки між об'єктами

На рисунку 18 похибку у визначенні координат розташування об'єктів графічно відображено у вигляді відстані між точками (розташування об'єкта після локалізації) та закінченнями ліній (реальне розташування об'єкт). Це краще видно при співставленні рисунків 18 а) і 16 б) При моделюванні, за допомогою алгоритму на вбудованій мові *MATLAB*, програмується математична модель алгоритму обмеження квадрату. Проходить імітація процесу визначення відстані, на основі часу отримання сигналу. Час отримання сигналу моделюється відносно реальної відстані між об'єктами, розташування яких було визначено на основі рівномірного закону розподілу. Також до часу отримання сигналу, в залежності від відстані між вузлами, довільним чином вноситься одна з чотирьох похибок (ΔT_{reply}) (табл. 4).

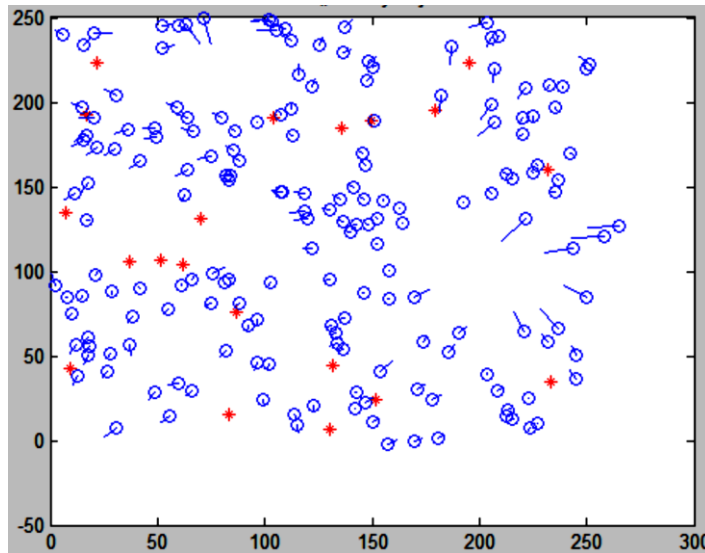


Рисунок 19 – Порівняння реальних позицій вузлів (позначено лініями) та результатів локалізації (позначено кружечками)

Отримано теоретичні оцінки похибок вимірювань різними методами, проведено експерименти з даною моделлю, при збільшенні кількості об'єктів, а також із застосуванням різних алгоритмів визначення відстані між об'єктами, з метою оцінки похибки локалізації, при застосуванні кожного з них. Також, для взаємоперевірки результатів.

Запропоновано, для взаємоперевірки результатів експерименту, включити до складу комп'ютеризованої сенсорної системи вимірювання відстані між об'єктами лазерні далекоміри, під'єднавши їх до БСПС.

Розроблено комп'ютеризований лазерний віддалемір з сенсорним мережевим інтерфейсом, що поєднує у собі функції лазерного далекоміра, використанням та методів визначення відстані між об'єктами безпроводних сенсорних приладів, що дає змогу оцінювати відстань на основі двох показників, з метою зменшення похибки $\Delta T_R \approx 3 \cdot 10^{-9}$ с, а також, враховуючи використання методу *Angle of Arrival* для визначення кута, буде виконувати функції електронного тахеометра, що на відміну від існуючих, зможе визначати лінійно кутові розміри до об'єктів в зоні не прямої видимості.

Показано, що адаптований алгоритм «Зважені черги» за критеріями пропускної спроможності каналів передавання, максимальної швидкості передавання показників, дальності передавання показників, кількості підканалів у 2 рази кращий, ніж інші.

Встановлено, при перевірці адекватності фільтру низьких частот, що похибка вимірювання часу розповсюдження сигналу становить $\Delta T_R \approx 3 \cdot 10^{-9}$ с.

Проведено експерименти з математичною моделлю для дослідження процесу вимірювання відстані в БСПС у поєднання з блоками лазерного віддалеміра. Це дало змогу отримати результати досліджень з достатньою точністю, а саме похибка $\delta \approx 2$ м, що є допустимим для ділянки (250x250) м.

В загальних висновках підсумовано основні результати досліджень, проведених у дисертаційній роботі, як теоретичних, так і експериментальних, отриманих в лабораторних умовах.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Проведено аналіз приладів та систем, що використовуються у класичних засобах вимірювальної техніки та БСПС для вимірювання відстані, часу проходження сигналу і кута між об'єктами, що може дати змогу порівнювати та коригувати параметри, що одержані методами метрології та комп'ютеризованих технологій.

2. Проведено аналіз методів та алгоритмів локалізації з використанням наступних параметрів систем: оцінка відстані/кута, обчислення позиції та алгоритм локалізації. Запропоновано моделі, методи та рекомендації вимірювання лінійно-кутових величин на основі часу отримання сигналу та падіння його потужності.

3. Запропоновано рівняння для визначення похибки часу отримання сигналу, з урахуванням перешкод, а також визначено основні параметри, що на неї впливають. Побудовано аналітичну модель визначення відстані між сенсорними прийомопередавачами, на основі часу отримання сигналу.

4. Запропоновано структурну схему мікропроцесорного первинного перетворювача на основі частоти сигналу, яка дозволяє реалізувати наведений алгоритм. Запропоновано рекомендації щодо покращення технічних характеристик безпроводних сенсорних приладів, шляхом додаткового застосування в пристроях БСПС цифрових первинних перетворювачів. Визначено, що різницю часу між ультразвуковим та радіосигналом, яка використовується для визначення відстані між об'єктами, можна визначити, за різницею періодів цих сигналів. Побудовано математичну модель роботи цифрового первинного перетворювача та проведено аналіз похибки квантування.

5. Запропоновано метод підвищення продуктивності комп'ютеризованих приладових вимірювальних систем, що об'єднує нижні рівні еталонної моделі OSI, у поєднанні з розширенням стандартної смуги частот, що покращило швидкість передачі показників вимірювань майже на 200 Кбіт/с. Модернізовано структурну схему маршрутного пристрою БСПС, функціонально об'єднавши блоки, що відповідають нижнім рівням еталонної моделі OSI. Запропоновано удосконалити принцип роботи маршрутного пристрою БСПС, ввівши в нього алгоритм, що оснований на перерозподілі пропускної спроможності каналу передавання.

6. Запропоновано в зонах невпевненого прийому для відновлення початкової послідовності бітів, з яких формуються пакети показників вимірювання на стороні приймача, застосовувати декодер Витербі на базі фільтру Гауса, що дає можливість приладовій системі аналізувати похибку не тільки поточного показника, але і порівнювати з похибками 6 попередніх показників вимірювання та забезпечує похибку вимірювання в межах $\Delta=(10^{-2} - 10^{-3})$ м.

7. Розроблено комп'ютеризований лазерний далекомір з сенсорним мережевим інтерфейсом, що поєднує у собі функції лазерного далекоміра, використанням та методів визначення відстані між об'єктами безпроводних сенсорних приладів, що дає змогу оцінювати відстань на основі двох

показників, з метою зменшення похибки $\Delta T_R \approx 3 \cdot 10^{-9}$ с, а також, враховуючи використання методу Angle of Arrival для визначення кута, буде виконувати функції електронного тахеометра, що на відміну від існуючих, зможе визначати лінійно кутові розміри до об'єктів в зоні непрямої видимості.

8. Проведено експериментальні дослідження процесу вимірювання відстані в БСПС у поєднання з блоками лазерного віддалеміра, що дало змогу отримати результати досліджень з достатньою точністю, а саме похибка $\delta \approx 10^{-2}$ м, що є допустимим для ділянки (250x250) м.

9. Вперше сформульовані нові принципи побудови приладових систем із включенням безпроводних сенсорних пристроїв для вимірювання механічних величин, що базуються на отриманні альтернативних показників вимірювання, завдяки функції локалізації сенсорів у складі комп'ютеризованої приладової системи;

10. Вперше розроблені нові підходи для вирішення проблеми визначення принципу дії мікропроцесорних первинних вимірювальних перетворювачів, що включені до складу безпроводних сенсорних пристроїв, для створення комп'ютеризованих приладових систем на їх основі та складені рівняння оцінки їх похибок.

11. Вдосконалено модель визначення відстані на основі часу отримання сигналу, що дає змогу оцінювати відстань по передньому фронту імпульсу та оцінити похибку з врахуванням перешкод.

12. Вдосконалено комп'ютеризований лазерний далекомір, до складу якого включено безпроводний сенсорний інтерфейс, що дає змогу оцінювати відстань на основі двох альтернативних показників.

13. Вперше розроблено метод підвищення продуктивності комп'ютеризованих сенсорних вимірювальних систем, з метою підвищення точності при передачі даних вимірювання, що можуть викликати недостовірну оцінку похибки в сенсорних приладах.

14. Дістала подальший розвиток методика локалізації безпроводних сенсорів, що дає змогу оцінити відстань між сенсорами, час проходження сигналу між ними, та кут, що в поєднанні з лазерними далекомірами утворює тахеометричну сенсорну приладову систему.

15. Дістала подальший розвиток методика визначення відстані між об'єктами в умовах відсутності прямої видимості, що відрізняється від існуючих методів далекометрії тим, що світловий промінь, який в них застосовується, не здатний розповсюджуватись по криволінійним траєкторіям.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Дуднік А.С. Комп'ютеризовані системи вимірювання механічних величин [Текст] / А. С. Дуднік, В. П. Квасніков. – Київ : Інтерсервіс, 2018. – 176 с. – ISBN 978-617-696-830-6.

2. Kvasnikov V. Relevance analysis of measurement mechanical quantities in the composition of the network “internet of things” and systems of professional cooperation during metrological studies [Текст] /V. Kvasnikov, A. Dudnik, Yu. Bondarenko // Relevant issues of development and modernization of modern science: the experience of countries of Eastern Europe and prospects of Ukraine: **monograph** / edited by authors. – Riga, Latvia : Izdevnieciba “Baltija Publishing”, 2018. – P. 144 -159. http://dx.doi.org/10.30525/978-9934-571-26-8_8 (Riga, Latvia)

Статті у фахових виданнях

3. Дуднік А.С. Спосіб підвищення продуктивності безпроводових комп'ютерних мереж на основі міжрівневої взаємодії та пристрій для його реалізації [Текст] / А.С. Дуднік, Є.В. Шевцова, О.О. Зубарева // Проблеми інформатизації та управління: збірник наукових праць. – 2011. – Вип. № 4 (36). – С. 45 – 50. **(РИНЦ, WorldCat, BASE)**

4. Дуднік А.С. Метод застосування протоколу БТР для надійності передачі даних безпроводових комп'ютерних мереж [Текст] / А.С. Дуднік, Ю.В. Бондаренко// Проблеми інформатизації та управління: збірник наукових праць. – 2013. – Вип. № 3 (43). – С. 22 – 26. **(РИНЦ, WorldCat, BASE)**

5. Дуднік А.С. Динамічний алгоритм у перерозподілу потоку заявок в безпроводових комп'ютерних мережах [Текст] /А.С. Дуднік// Вісник Інженерної академії України. – 2016. – Вип. № 4. – С. 102-104.

6. Дуднік А.С. Аналіз декомпозиції нижніх рівнів еталонної моделі OSI на прикладі пристрою підвищення продуктивності безпроводових комп'ютерних мереж [Текст] /А.С. Дуднік// Вісник Інженерної академії України. – 2017. – Вип. № 1. – С. 66-69.

7. Дуднік А.С. Математичні моделі прогнозування для хмарних комп'ютеризованих систем [Текст] / А.С. Дуднік, Л.І. Кубушка В.О. Погіба // Вісник Інженерної академії України. – 2017. – Вип. № 3. – С.98 -103.

8. Квасніков В.П. Аналіз приладів вимірювання відстані та безпроводних сенсорних мереж [Текст] /В.П. Квасніков, А.С. Дуднік// Вісник Інженерної академії України. – 2017. – Вип. № 4. – С.115 -118.

9. Дуднік А.С. Розробка мікропроцесорного частотоміра для комп'ютеризованих систем вимірювання відстані [Текст] /А.С. Дуднік // Вісник Інженерної академії України. – 2018. – Вип. № 1. – С.162 -167.

10. Дуднік А.С. Застосування датчиків вимірювання механічних величин в комп'ютерній мережі «Розумний дім» [Текст] /А.С. Дуднік // Метрологія та прилади . – 2017. – Вип. № 5. – С.106 -110. **(Index Copernicus)**

11. Квасніков В.П. Наукові основи визначення відстані між об'єктами за допомогою комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин [Текст] /В.П. Квасніков, А.С. Дуднік// Метрологія та прилади . – 2018. – Вип. № 3. – С.21 -26. **(Index Copernicus)**

12. Дуднік А.С. Модель сенсорного комп'ютеризованого приладу вимірювання відстані [Текст] / А.С. Дуднік, В.П. Квасніков // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип. № 1 (81). – С.114 -118. [https://doi.org/10.26642/tn-2018-1\(81\)-114-118](https://doi.org/10.26642/tn-2018-1(81)-114-118) **(Index Copernicus, DOAJ, WorldCat, BASE)**

13. Дуднік А.С. Розробка методу підвищення продуктивності сенсорних мереж вимірювання відстані [Текст] / А.С. Дуднік // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2018. – Вип. № 3/2 (41). – С.114 -118. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.135486> (**Index Copernicus, DOAJ, WorldCat, BASE, ПИНЦ**)

14. Дуднік А.С. Дослідження лазерного віддалеміра з сенсорним мережевим інтерфейсом [Текст] / А.С. Дуднік // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2018. – Вип. № 4/2 (42). – С.35 -40. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.141190> (**Index Copernicus, DOAJ, WorldCat, BASE, ПИНЦ**)

15. Дуднік А.С. Аналітична модель вимірювання відстані за допомогою сенсорних мереж та оцінка похибки вимірювання [Текст] / А.С. Дуднік, В.П. Квасніков // Вісник Черкаського державного технологічного університету . – 2018. – Вип. №2 . С. 21 -26.

16. Квасніков В.П. Визначення відстані між об'єктами за допомогою комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин [Текст] / В.П. Квасніков, А.С. Дуднік // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – 2018. – Вип. № 1(12). С. 54 -60. <https://doi.org/10.32684/2412-5288-2018-1-12-52-58>

17. Дуднік А.С. Методи визначення відстані між об'єктами сенсорних мереж [Текст] / А.С. Дуднік // Математичне та комп'ютерне моделювання. Серія: Технічні науки. – 2018. – Вип. № 17. С. 40 -49. (**Norwegian Register for Scientific Journals, BASE, Citefactor, GIF, SIS**)

18. Дуднік А.С. Метод вимірювання відстані між об'єктами сенсорних мереж засобами мікропроцесорного фазометра [Текст] / А.С. Дуднік // Технічні науки та технології. – 2018. Вип. № 2(12). С. 136 -141. [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2\(12\)-136-141](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2018-2(12)-136-141) (**Index Copernicus, OJS, ResearchBib, WorldCat, BASE ПИНЦ**)

19. Dudnik A. Method for measuring the distance between objects using a digital frequency measuring device [Текст] / A.Dudnik // European Journal of Technical and Natural Sciences. – 2018. # 4. P. 19 -24. (**ULRICHSWEB, BASE, EBSCO, eLIBRARY.RU, OpenAIRE, RePEc, ROAR, WorldCat**) (іноземне видання)

20. Dudnik A. Evaluation of wireless signal computerized systems of measurement of mechanical quantities at constant distance in medium fire [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Norwegian Journal of development of the International Science. – 2018. # 21. Vol. 2. P. 56 -60. (**eLIBRARY.RU**) (іноземне видання)

21. Dudnik A. Models and methods of growth of productivity of wireless networks in components of computerized systems of measurement of mechanical quantities [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Sciences of Europe. – 2018. # 29. Vol. 2. P. 54 -60. (**DIIF, eLIBRARY.RU, GIF, Calameo, ISSUU, Slideshare**) (іноземне видання)

22. Dudnik A. Development microprocessor device measuring power for computer systems measure the distance [Текст] / A.Dudnik // Sciences of Europe. – 2018. # 28. Vol. 1. P. 64 -68. (**DIIF, eLIBRARY.RU, GIF, Calameo, ISSUU,**

Slideshare) (іноземне видання)

23. Dudnik A. Development of mathematical models for the determination of to determine the distance between the nodes in sensor networks [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // East European Science Journal. – 2018. # 7(35). Vol. 2. P. 12 -14. (**eLIBRARY.RU, ResearchBib, ISI, Slideshare, Cosmos impact factor**) (іноземне видання)

24. Dudnik A. Method of devices wireless sensor networks and motion sensors for military purposes [Текст] / A.Dudnik, O. Cholishkina, Yu. Bondarenko // East European Science Journal. – 2018. # 6(34). Vol. 1. P. 37 -41. (**eLIBRARY.RU, ResearchBib, ISI, Slideshare, Cosmos impact factor**) (іноземне видання)

25. Dudnik A. Analysis of technology "internet of things" in the military sphere [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Colloquium-journal. – 2018. # 8(19). Vol. 1. P. 16 -19. (**Index Copernicus, ПИИЦ, Calameo, ISSUU, Slideshare**) (іноземне видання)

26. Dudnik A. Analysis technology "internet of things" as a means of mechanical quantities measurement system "smart home" [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Colloquium-journal. – 2018. # 7(18). Vol. 3. P. 29 -30. (**Index Copernicus, ПИИЦ, Calameo, ISSUU, Slideshare**) (іноземне видання)

27. Dudnik A. Modeling determine the distance between nodes in sensor networks computerized system for measuring mechanical quantities [Текст] / A.Dudnik // Spirit time. – 2018. # 8 Vol. 1. P. 14 -18. (**ПИИЦ, ScholarGoogle, Calameo, ISSUU, Slideshare**) (іноземне видання)

Патенти на корисну модель

28. Патент №60400 (Україна), МПК H04B 7/005. Пристрій підвищення якості передавання даних в бездротових мережах в зонах невпевненого прийому або з недостатньою завадостійкістю [Текст] / А. С. Дуднік, Є.В. Шевцова, М.М. Яценко, О.О. Зубарева. – Реєстрац. номер заявки 201007469. Опубліковано в бюлетені №12 від 25.06.2011.

29. Патент №69626 (Україна), МПК H04B 7/005. Безпроводовий маршрутизатор з динамічним перерозподілом потоку заявок [Текст] / А. С. Дуднік, В.П. Якунін. – Реєстрац. номер заявки 201111748. Опубліковано в бюлетені №9 від 10.05.2012.

Тези доповідей в збірниках матеріалів конференцій

30. Дуднік А.С. Засоби підвищення якості передавання даних безпроводових комп'ютерних мереж [Текст] / А.С. Дуднік, Ю.В. Бондаренко // Управління, автоматизація та навколишнє середовище: III міжнар. наук.-практ. конф. 14 – 17 травня 2012 р.: тези допов.– Севастополь, 2012 р. С. 249 -253.

31. Дуднік А.С. Аналіз технічних характеристик пристроїв бездротових мереж [Текст] / А.С. Дуднік, Г.В. Єрмоленко // Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії: V міжнар. наук.-практ. конф. 30 – 31 серпня 2014 р.: тези допов.– Переяслав-Хмельницький, 2014 р. С. 203 -205.

32. Дуднік А.С. Застосування датчиків вимірювання механічних величин в комп'ютерній мережі «розумний дім» [Електронний ресурс] / А. С. Дуднік // Метрологія і інформаційно-вимірювальна техніка: міжнар. наук.-практ. конф.,

22 листопада 2017 р.: тези допов. – К., 2017. – Режим доступу: http://imt.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/11/ZASTOSUVANNYA-DATCHYKIV-VYMYRYUVANNYA-MEHANICHNYH-VELYCHYN-V-KOMP-YUTERNIJ-MEREZHI-ROZUMNYJ-DIM_.pdf

33. Дуднік А.С. Організація технології «інтернет речей» засобами безпроводових комп'ютерних мереж із застосуванням датчиків вимірювання механічних величин [Текст] / А. С. Дуднік // Машинобудування очима молодих: Прогресивні ідеї – наука – Виробництво: XVII міжнар. наук.-практ. конф., 01 – 03 листопада 2017 р.: тези допов. – Чернігів., 2017. – С. 220 – 221.

34. Дуднік А.С. Метод математичного прогнозування за допомогою часових рядів [Текст] / А.С. Дуднік, Л.І. Кубушка В.О. Погіба // Актуальні проблеми інформаційних технологій: наук.-практ. конф., 8 – 10 листопада 2017 2017 р.: тези допов. – К., 2017. – С. 33.

35. Дуднік А.С. Рекомендації щодо застосування «пристрою підвищення якості передавання даних в бездротових мережах в зонах невпевненого прийому або з недостатньою завадостійкістю» та датчиків руху у військових цілях [Текст] / А.С. Дуднік, Ю.В. Кравченко, В.П. Квасніков // Удосконалення та модернізація озброєння, військової та спеціальної техніки, що знаходиться на озброєнні Збройних Сил України, шляхом впровадження технічних рішень, що охороняються патентами України на винахід та корисну модель: наук.-практ. конф., 30 листопада 2017 р.: тези допов. – К., 2017. – С. 106 – 108.

36. Дуднік А.С. Визначення відстані між об'єктами на основі часу отримання сигналу [Текст] / А. С. Дуднік // Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації: VIII міжнар. наук.-практ. конф., 18 – 20 квітня 2018 р.: тези допов. – Кам'янець-Подільський., 2018. – С. 25 – 26.

37. Дуднік А.С. Організація технології «Інтернет речей» засобами безпроводових комп'ютерних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси: X міжнар. наук.-практ. конф., 16 – 17 травня 2017 р.: тези допов. – К., 2017. – С. 239 – 241.

38. Дуднік А.С. Взаимодействие технологий «интернет вещей» и «блэйчейн» при измерении механических величин [Текст] / А. С. Дуднік, Л. Мелконян // Інтегровані інтелектуальні робото-технічні комплекси: XI міжнар. наук.-практ. конф., 22 – 23 травня 2018 р.: тези допов. – К., 2018. – С. 285 – 287.

39. Дуднік А.С. Аналіз пристроїв безпроводних вимірювальних сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Актуальні проблеми сучасної науки: XXXI міжнар. наук.-практ. конф., 29 червня 2018 р.: тези допов. – Москва–Астана–Харків–Відень., 2018. – С. 71 – 72.

40. Дуднік А.С. Методи обчислення потужності для визначення відстані між об'єктами на основі падіння рівня сигналу [Текст] / А. С. Дуднік // Актуальні проблеми сучасної науки: XXXII міжнар. наук.-практ. конф., 31 липня 2018 р.: тези допов. – Санкт-Петербург–Астана–Київ–Відень., 2018. – С. 71 – 72.

41. Дуднік А.С. Вимірювання локації об'єктів за допомогою сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання: міжнар. наук.-практ. конф., 14 – 19 травня 2018 р.: тези допов. –

Івано-Франківськ., 2018. – С. 71 – 72.

42. Дуднік А.С. Методи визначення координат на основі дальності сигналу та обчислення позиції розташування у пристроях сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: VIII міжнар. наук.-практ. конф., 10 – 12 травня 2018 р.: тези допов. – Чернігів., 2018. – С. 173.

43. Квасніков В.П. Математична модель локалізації об'єктів за допомогою комп'ютеризованих систем вимірювання механічних величин [Текст] / В.П. Квасніков, А.С. Дуднік // Технічне регулювання, метрологія та якість: виклики сучасності: IX Всеукраїнська наук.-практ. конф., 17 – 18 травня 2018 р.: тези допов. – Одеса., 2018. – С. 59 -60.

44. Дуднік А.С. Аналіз сенсорного мережевого приладу вимірювання відстані між об'єктами [Текст] / А.С. Дуднік, О.Г. Чолишкіна, М.Г. Луцький // Інноваційний розвиток науки нового тисячоліття: III міжнар. наук.-практ. конф., 25 – 26 травня 2018 р.: тези допов. – Чернівці., 2018. – С. 135 – 137.

45. Дуднік А.С. Будова та принцип роботи комп'ютеризованого лазерного віддалеміра з сенсорним мережевим інтерфейсом [Текст] / А.С. Дуднік // Теорія і практика сучасної науки: III міжнар. наук.-практ. конф., 29 – 30 червня 2018 р.: тези допов. – Київ., 2018. – С. 100 – 102.

46. Дуднік А.С. Аналіз методів вимірювання механічних величин та принципів їх виконання [Текст] / А.С. Дуднік // Сучасні тенденції розвитку науки: III міжнар. наук.-практ. конф., 27 – 28 липня 2018 р.: тези допов. – Львів., 2018. – С. 82 – 85.

Статті у інших виданнях

47. Dudnik A. The concept of a sensory network measuring mechanical quantities [Текст] / A.Dudnik // International scientific journal "Internauka". — 2018. — №10. Vol. 2. P. 7 -10. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2018-10-3889> **(РИНЦ, ScholarGoogle, OAJI, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

48. Dudnik A. The role of technology of professional interaction of "Internet Things" when measuring mechanical quantities [Текст] / A.Dudnik, Yu. Bondarenko // Молодий вчений. — 2018. — №2. С. 15 -19. **(РИНЦ, OAJI, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

49. Дудник А. С. Анализ технологии применения блокчейн совместно с технологией интернет вещей для обработки и хранения результатов измерений [Текст] / А. С. Дудник, О. Г. Чолишкіна, М. Г. Луцкий // Молодий вчений. — 2018. — №5. С. 179 -183. **(РИНЦ, OAJI, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

50. Дуднік А. С. Аналіз методів вимірювання відстаней між об'єктами за допомогою сенсорних мереж [Текст] / А. С. Дуднік // Молодий вчений. — 2018. — №3. С. 213 -216. **(РИНЦ, OAJI, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

51. Дуднік А. С. Дослідження похибки інформаційних систем вимірювання механічних величин [Текст] // Scientific Journal «ScienceRise». — 2018 — №7(48).С. 34 -37. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2018.140057> **(РИНЦ, OAJI, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

52. Дуднік А. С. Метод побудови комп'ютеризованого лазерного віддалеміра з сенсорним мережевим інтерфейсом [Текст] / А. С. Дуднік // Молодий вчений. — 2018. — №6. С. 15 -18. **(РИНЦ, ОАЛ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

53. Дуднік А. С. Методи підвищення продуктивності пристроїв безпроводних вимірювальних сенсорних мереж [Текст] // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2018. — №12. С. 41 -46. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2018-12-3993> **(РИНЦ, ОАЛ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

54. Дуднік А. С. Приклади застосування безпроводних сенсорних мереж у якості засобів вимірювання механічних величин [Текст] / А. С. Дуднік // Молодий вчений. — 2018. — №4. С. 182 -184. **(РИНЦ, ОАЛ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

55. Дуднік А. С. Систематизація вимірювальних приладів відповідно до методів вимірювання механічних величин та принципів їх виконання [Текст] / А. С. Дуднік // Молодий вчений. — 2018. — №7. С. 168 -172. **(РИНЦ, ОАЛ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

56. Дуднік А. С. Метод вимірювання відстані між об'єктами в сенсорних мережах за допомогою цифрового частотоміра середніх значень [Текст] // Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". — 2018. — №13. С. 45 -49. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2018-13-4031> **(РИНЦ, ОАЛ, CiteFactor, Research Bible, Index Copernicus)**

57. Скуратовський Р.В. Властивості скрученої кривої Едвардса, можливість поділу точки навпіл і їх застосування в криптографії [Текст] / Скуратовський Р.В., А.С. Дуднік, Д.М. Квашук // Проблеми інформатизації та управління: збірник наукових праць. — 2017. — Вип. № 4 (60). — С. 71 – 78. **(РИНЦ, WorldCat, BASE)**

58. Дуднік А.С. Система покращеного передавання даних безпроводових комп'ютерних мереж стандарту IEEE 802.11. [Текст] / А.С. Дуднік, Ю.В. Бондаренко// Наука і молодь: збірник наукових праць. — К.: НАУ, 2012. — Вип. № 11(12). — С. 113-116.

59. Дуднік А.С. Динамічний алгоритм управління перерозподілом мережевого трафіку у безпроводових інформаційних системах [Текст] / А. С. Дуднік // Проблеми модернізації України. — 2015. — Вип. № 1. — С. 126 -129.

60. Dudnik A. The concept of measuring mechanical quantities in "smart home" technology [Текст] / A. Dudnik, V. Lyudvychenko // Проблеми модернізації України. — 2018. — Вип. № 6. — С. 150 -151.

АНОТАЦІЯ

Дуднік А.С. Наукові основи комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин. — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.01 «Прилади та методи вимірювання механічних величин». — Національний авіаційний університет, Київ. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря

Сікорського». – 2018.

У дисертаційній роботі отримано такі нові наукові результати.

Вперше сформульовані нові принципи побудови приладових систем із включенням безпроводних сенсорних пристроїв для вимірювання механічних величин, що базуються на отриманні альтернативних показників вимірювання, завдяки функції локалізації сенсорів у складі комп'ютеризованої приладової системи;

Вперше розроблені нові підходи для вирішення проблеми визначення принципу дії мікропроцесорних первинних вимірювальних перетворювачів, що включені до складу безпроводних сенсорних пристроїв, для створення комп'ютеризованих приладових систем на їх основі та складені рівняння оцінки їх похибок;

Вдосконалено модель визначення відстані на основі часу отримання сигналу, що дає змогу оцінювати відстань по передньому фронту імпульсу та оцінити похибку з врахуванням перешкод;

Вдосконалено комп'ютеризований лазерний далекомір, до складу якого включено безпроводний сенсорний інтерфейс, що дає змогу оцінювати відстань на основі двох альтернативних показників;

Вперше розроблено метод підвищення продуктивності комп'ютеризованих сенсорних вимірювальних систем, з метою підвищення точності при передачі даних вимірювання, що можуть викликати недостовірну оцінку похибки в сенсорних приладах (захищено патентами України на корисну модель № 60400 і № 69626);

Дістала подальший розвиток методика локалізації безпроводних сенсорів, що дає змогу оцінити відстань між сенсорами, час проходження сигналу між ними, та кут, що в поєднанні з лазерними далекомірами утворює тахеометричну сенсорну приладову систему;

Дістала подальший розвиток методика визначення відстані між об'єктами в умовах відсутності прямої видимості, що відрізняється від існуючих методів далекометрії тим, що світловий промінь, який в них застосовується, не здатний розповсюджуватись по криволінійним траєкторіям.

Ключові слова: безпроводний сенсор, приладова система, лазерний далекомір, визначення відстані, первинний перетворювач, точність визначення позиції, оцінка похибки локалізації, формула Фрісса, фільтрація сигналів, метод підвищення продуктивності.

АННОТАЦІЯ

Дудник А.С. Научные основы компьютеризированных сенсорных систем измерения механических величин. - Квалификационная научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.01 «Приборы и методы измерения механических величин». - Национальный авиационный университет, Киев. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского». - 2018.

В диссертационной работе получены следующие новые научные

результаты.

Впервые сформулированы новые принципы построения приборных систем с включением беспроводных сенсорных устройств для измерения механических величин, основанных на полученные альтернативных показателей измерения, благодаря функции локализации сенсоров в составе компьютеризированной приборной системы.

Впервые разработаны новые подходы к решению проблемы определения принципа действия микропроцессорных первичных измерительных преобразователей, включенных в состав беспроводных сенсорных устройств, для создания компьютеризированных приборных систем на их основе и составлены уравнения оценки их погрешностей;

Усовершенствована модель определения расстояния на основе времени прибытия сигнала позволяет оценивать расстояние по переднему фронту импульса и оценить погрешность с учетом препятствий;

Усовершенствована компьютеризированный лазерный дальномер, в состав которого входит беспроводной сенсорный интерфейс, что позволяет оценивать расстояние на основе двух альтернативных показателей;

Впервые разработан метод повышения производительности компьютеризированных сенсорных измерительных систем, с целью повышения точности при передаче данных измерения, которые могут вызвать недостоверную оценку погрешности в сенсорных устройствах (защищено патентами Украины на полезную модель № 60400 и № 69626) Получила дальнейшее развитие методика локализации беспроводных сенсоров, позволяет оценить расстояние между сенсорами, время прохождения сигнала между ними, и угол, в сочетании с лазерными дальномерами образует тахеометрическую сенсорную приборную систему;

Получила дальнейшее развитие методика определения расстояния между объектами в условиях отсутствия прямой видимости, отличающийся от существующих методов далекометрии тем, что световой луч, который в них применяется, не способен распространяться по криволинейным траекториям.

Впервые разработана математическая модель для исследования процесса измерения расстояния в беспроводных сенсорных сетях в сочетании с блоками лазерного дальномера. Входными параметрами со стороны сенсорной БСПС есть мощности отправленного и принятого сигнала, а со стороны лазерного дальномера - скорость света в вакууме, показатель преломления среды и время прохождения луча до цели и обратно. Выходными параметрами, в обоих случаях, является расстояние между объектами, полученная двумя разными методами. Это позволило получить результаты исследований с достаточной точностью, путем сопоставления исходных параметров, а именно погрешность $\delta \approx 0,2\%$, что является допустимым для участка 250×250 м;

Модернизировано структурную схему сенсорного беспроводного устройства, путем включения в ее состав блоков лазерного дальномера. Что дает возможность получить альтернативное значение расстояния между объектами. Это позволило, при постоянных помехах, снизить погрешность измерения в 2,5 раза, используя для сопоставления данные сенсорной БСПС и

лазерного дальномера;

Разработана математическая модель определения расстояния между сенсорными передатчиками, на основе времени прибытия сигнала, а также проведена оценка погрешности определения времени прибытия сигнала по переднему фронту импульса, а также определены основные параметры, на нее влияют;

Разработан метод повышения производительности компьютеризированных сенсорных измерительных систем, по сравнению с существующими позволяет увеличить дальность измерений до 15 - 17 м, при этом показатели погрешности сохраняются в пределах $\delta \approx 0,2\%$, при общей дальности 160 м;

Разработан маршрутный сенсорный прибор, способный перераспределять измерительные сигналы, чтобы избежать ошибок при обработке данных измерения механических величин в компьютеризированной сенсорной приборной системе;

Модернизировано сенсорный измерительное устройство, введя в их состав микропроцессорные первичные преобразователи, что позволяет более точно анализировать погрешность измерений.

Ключевые слова: беспроводной сенсор, приборная система, лазерный дальномер, определения расстояния, первичный преобразователь, точность определения позиции, оценка погрешности локализации, формула Фриссе, фильтрация сигналов, метод повышения производительности.

SUMMARY

Dudnik A.S. Scientific fundamentals of computerized sensory systems for measuring mechanical quantities. - Qualifying scientific work on the rights of manuscripts.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.11.01 "Instruments and methods of measuring mechanical quantities". - National Aviation University, Kyiv. National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky". – 2018

In the dissertation work such new scientific results are obtained.

For the first time, new principles for the construction of instrumentation systems with the inclusion of wireless sensor devices for measuring mechanical quantities based on the received alternative measurement indicators, due to the function of the localization of sensors in the computerized instrument system, are formulated;

New approaches for solving the problem of determining the principle of operation of microprocessor primary measuring transducers included in the wireless sensory devices have been developed for the first time for the creation of computerized instrument systems on their basis and compiled equations for estimating their errors;

The model of distance determination based on the arrival time of the signal is improved, which enables to estimate the distance along the front of the impulse and to estimate the error with allowance for obstacles;

The computerized laser rangefinder has been improved, which includes a wireless touch interface, which allows to estimate the distance based on two alternative indicators;

For the first time, a method for increasing the productivity of computerized sensory measuring systems has been developed, in order to increase the accuracy in transmitting measurement data, which may cause an unreliable estimation of error in sensory devices (protected by Ukrainian patents for utility model No. 60400 and No. 69626);

The method of localization of wireless sensors was developed further, which enables to estimate the distance between the sensors, the time of the signal passing between them, and the angle which, in combination with the laser rangefinders, forms a tacheometric sensory device system;

The method of determining the distance between objects in the absence of direct visibility, which differs from the existing methods of remoteometry by the fact that the light ray used in them, is not able to propagate along curvilinear trajectories.

Key words: wireless sensor, instrumentation system, laser rangefinder, distance determination, primary converter, precision position determination, estimation of localization error, Frissa formula, signal filtering, productivity enhancement method.